

分 类 号：TP391
研究生学号：201601015

单位代码：10190
密 级：公 开

長春工業大學
碩 士 專 業 學 位 論 文

朱非凡

2019 年 6 月



云制造环境下资源动态调度研究

Research on Dynamic Resource Scheduling in Cloud Manufacturing

硕 士 研 究 生：朱非凡

校 内 导 师：胡艳娟副教授

企 业 导 师 邵春平高级工程师

申 请 学 位：工程硕士

领 域：机械工程

所 在 单 位：机电工程学院

答 辩 日 期：2019 年 6 月

授予学位单位：长春工业大学

长春工业大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的硕士学位论文《云制造环境下资源动态调度研究》，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果，不存在学位论文买卖、代写、抄袭等学术不端行为。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者 签名：朱非凡

校内导师签名：胡艳娟

企业导师签名：邵春平

日 期：2019年6月16日

长春工业大学硕士学位论文版权使用授权书

学位论文作者及指导教师完全了解“长春工业大学研究生学位论文版权使用规定”，同意长春工业大学保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权长春工业大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。保密的论文在解密后遵守此规定。

作者 签名：朱非凡

校内导师签名：胡艳娟

企业导师签名：邵春平

日 期：2019年6月16日

摘 要

随着云计算，物联网等 IT 技术的快速发展，“敏捷”、“智能”、“高效”，“绿色”已成为制造业发展的主题。在此背景下，2010 年李伯虎院士及其团队率先提出一种制造新模式——云制造。云制造模式经过近年来的发展在理论研究与实践应用方面都已取得阶段性成果。资源调度是云制造模式的核心组成部分，随着以制造即服务为核心理念的云制造相关技术的快速发展，高效实现云制造环境下的资源调度，业已引起研究者的广泛关注。在云制造系统中调度是云制造系统作为“大脑”智能处理制造任务与制造资源进行供需匹配的有效手段。

首先，通过对国内外的相关文献进行研究，阐述了本文的研究背景与研究意义，并提出了本文的研究内容。

其次，对云制造环境中制造任务类型，制造资源的特性进行了分析。对云制造环境下基于制造任务变化的资源动态调度问题进行研究，模拟在云制造服务平台中多种类型任务同时执行，并在调度的过程中考虑各类突发事件，如新任务加入，任务属性变化及任务撤销。本文考虑了二级制造任务之间的执行顺序及不同执行资源间的物理距离，构建兼顾总制造服务时间最小，总制造服务成本最小，平均制造服务满意度最高，资源间负载均衡度最小的多目标优化调度模型，通过层次分析法确定各指标之间的权重，采用多层编码的遗传算法对该问题进行求解，仿真结果表明所建立的调度指标全面、有效，基于调度指标所建立的调度数学模型，可以将云制造环境下影响资源调度的主要因素融合到一起，将复杂的调度问题转化为数学问题求解。

最后，对云制造环境下基于制造资源动态变化的调度问题进行了研究，对资源动态特性进行分析，研究了基于资源属性变化，新资源接入，资源维修及资源撤销等情况下的资源调度问题，建立了以总制造服务时间，总制造服务成本，平均制造服务效率，平均资源可靠度为优化目标的调度模型，并采用改进粒子群算法对该模型进行求解，实现了在多干扰条件下调度系统的有效处理，增强了调度系统的柔性。

关键词：云制造 制造资源 动态调度 遗传算法 粒子群算法

Abstract

With the rapid development of cloud computing, Internet of Things and other IT technologies. The agility, intellectualization, high efficiency and green has become the theme of manufacturing development. In this context, in 2010, Academician Li Bohu and his team took the lead in proposing a new model for manufacturing-Cloud Manufacturing. After years of development, the cloud manufacturing model has achieved phased results in both theoretical research and practical applications. Resource scheduling is a core component of the cloud manufacturing model. With the rapid development of cloud manufacturing related technologies, efficient and rapid resource scheduling in cloud manufacturing environments has attracted wide attention of researchers. Scheduling is an effective means for cloud manufacturing systems to intelligently complete manufacturing tasks and manufacturing resource matching and as a "brain".

Firstly, this paper has studied the related literatures at home and abroad. And then expounded the research background and research significance of this paper. And last the research content of this paper is put forward.

Secondly, the types of manufacturing tasks and the characteristics of manufacturing resources in the cloud manufacturing environment were analyzed. In this paper, we research the dynamic scheduling of resources based on manufacturing task changes in the cloud manufacturing environment, and simulate the simultaneous execution of multiple types of tasks in the cloud manufacturing service platform. And we consider various types of emergencies in the scheduling process, such as new task addition, task attribute change and task revocation. At the same time, we also consider the order of execution between the secondary manufacturing tasks and the physical distance between different execution resources. In this paper, a multi-objective optimal scheduling model with minimum total manufacturing service time, minimum total manufacturing service cost, highest average manufacturing service satisfaction and minimum load-to-resource balance is constructed. The weights between the indicators are determined by AHP. What's more, the multi-level coding genetic algorithm is used to solve the problem. The simulation results show that the established scheduling indicators are comprehensive and effective. Based on the scheduling mathematical model established by the scheduling indicators, the main factors affecting resource scheduling in the cloud manufacturing environment can be integrated.

At the same time, complex scheduling problems can be transformed into mathematical problem solving.

Finally, in this paper, we study the scheduling problem based on the dynamic change of manufacturing resources in the cloud manufacturing environment. Analyzing the dynamic characteristics of resources, and research the changes based on resource attributes, such as new resource access, resource maintenance and resource withdrawal. In this paper, a scheduling model with total manufacturing service time, total manufacturing service cost, average manufacturing service efficiency, and average resource reliability as optimization targets is established. The improved particle swarm algorithm is used to solve the model. In this paper, the effective processing of the scheduling system under multi-interference conditions is realized. The flexibility of the scheduling system is enhanced.

Key words: Cloud manufacturing Manufacturing resources Dynamic scheduling
Genetic algorithm Particle swarm optimization

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
第1章 绪 论.....	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 云制造研究现状	3
1.2.2 云制造环境下资源调度研究现状	7
1.3 云制造环境下资源动态调度研究的必要性	11
1.4 本文研究内容	12
1.5 本章小结	12
第2章 基于云制造任务变化的资源动态调度建模	13
2.1 云制造任务	13
2.1.1 云制造任务信息描述	13
2.1.2 云制造任务动态性分析	14
2.2 基于云制造任务变化的资源动态调度问题描述	14
2.3 云制造资源调度指标建立	16
2.4 基于云制造任务变化的资源动态调度数学模型	17
2.4.1 数学符号及其描述	17
2.4.2 优化目标	18
2.4.3 约束条件	19
2.5 本章小结	20
第3章 基于云制造任务变化的资源动态调度仿真	22
3.1 遗传算法	22
3.2 基于层次分析法的权重计算	24
3.2.1 层次分析法基本原理	24
3.2.2 层次分析法求解步骤	24
3.2.3 权重计算	26
3.3 基于多层编码遗传算法的资源动态调度	27

3.3.1 个体编码	28
3.3.2 适应度函数的构造	29
3.3.3 选择操作	29
3.3.4 交叉操作	29
3.3.5 变异操作	30
3.4 仿真验证	33
3.5 本章小结	40
第4章 基于资源变化的动态调度建模	41
4.1 云制造资源	41
4.2 基于资源变化的动态调度问题描述	41
4.3 基于资源变化的动态调度数学模型	43
4.3.1 数学符号及其描述	43
4.3.2 优化目标	44
4.3.3 约束条件	45
4.4 本章小结	46
第5章 基于资源变化的动态调度仿真	48
5.1 粒子群优化算法	48
5.1.1 粒子群算法基本原理	48
5.1.2 粒子群算法流程及步骤	49
5.2 基于改进粒子群算法的资源动态调度	50
5.2.1 编码	50
5.2.2 适应度函数构造	51
5.2.3 粒子位置与速度更新	52
5.2.4 粒子群算法的改进	52
5.3 仿真分析	53
5.4 本章小结	61
第6章 结论和展望	62
6.1 结论	62
6.2 展望	63
致 谢	64
参考文献	65
附 录	71
攻读硕士期间研究成果	85

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

伴随三次工业革命的完成,世界范围内的制造业生产模式由传统的手工业生产向大规模机械化生产转变继而转向现代的智能化制造。制造业的发展水平是衡量一个国家工业化程度的重要标志。我国作为制造业大国紧随世界发展的脚步,制造业作为我国经济发展的基础,在我国经济发展中扮演着重要角色。步入 21 世纪后,科学技术日新月异,技术的更迭周期越来越短,随着云计算、互联网、制造网格等新兴 IT 技术的快速发展,企业的生产和发展与网络的联系越来越紧密,企业需要在先进技术的支撑下、优化产业结构、加速产业升级,增强企业核心竞争力。服务化、协同化和信息化是新型制造模式的标志,高效、共享、绿色、网络是新阶段制造业的主题。现代化的制造模式进一步利用信息通讯技术和网络虚拟技术实现高效,智能的资源共享。在世界范围内,各国为进一步提高制造业竞争能力,相继出台各自的制造业发展战略,美国奥巴马政府于 2012 年提出“国家制造业创新网络计划”(National Network for Manufacturing Innovation (NNMI)),2013 年德国默克尔政府推出“Industry4.0”战略,法国的新工业法国 (Nouvelle France Industrielle) 及斯洛伐克的智能工业 (Smart Industry)。新的工业革命正在悄然进行中,我国的制造业发展不平衡,整体工业基础有待提高,加快节奏跟上世界先进的制造模式是我国如何实现由“Made in China”转变为“Created in China”的关键,同时也是实现我国《中国制造 2025》远大目标的基石。在此背景下,2010 年由李伯虎院士及其团队率先提出云制造 [1] (Cloud Manufacturing:CMfg) 的概念。所谓云制造既是一种面向服务的,高能低耗的网络化制造新模式,其融合了云计算、物联网、大数据、语义 Web 等 IT 技术,将制造业和互联网相结合充分发挥了互联网的信息共享、高效,低损耗的特性。经过近些年的发展,云制造理论得到了极大的丰富,其先进的制造模式也相继被各大公司采用。其中比较有代表性的有海尔云制造服务平台,中国北车集团云制造服务平台等。

我国作为一个制造业大国具备制造资源基数大,种类繁多,资源差异性大等特点,同时各类制造企业的规模,制造能力各不相同,因此不同的企业所具备的资源服务能力和需求的资源也具有差异性。大集团型企业具备完善的制造生产链和雄厚的资本,规模较小的企业没有足够的资金购买昂贵的设备资源、技术人才资源为其服务,从而相当一部分企业因此失去了企业的竞争力。在云制造环境下企业之间实现资源共享,

一些企业的闲置资源以数据的形式存储在云制造服务平台中，需求资源的企业可以从云制造服务平台中去“租赁”需要的资源为其服务，并支付相应的“租赁”成本，这样大大的减少了使用资源成本，为企业的进一步发展提供有利条件，资源提供企业也会因为资源“租赁”进而提高了资源的使用效率。因此，在云制造模式下企业间资源的协同，共享得到充分体现。

在云制造模式中会接收到大量的服务请求信息，云制造服务平台根据服务请求信息智能的调度相应的资源，为资源需求方进行服务是云制造模式中的重要一环。云制造服务平台接收到用户的服务请求后，云制造服务平台根据用户的要求（时间，效率，成本等）给出最优的资源调度组合。云制造平台根据最优组合对资源进行调度从而在满足客户要求的同时也极大地提高了资源的使用率。资源调度方案的优劣会直接影响是否能够满足用户需求（按时交货，低成本等），本课题正是在这样的背景下对云制造环境下资源调度问题展开相关研究。

1.1.2 研究意义

在云制造环境下，云制造服务平台将各类分散的制造资源和制造能力进行虚拟化，服务化后形成虚拟化的制造资源池，并通过网络进行集中地管理和经营。云制造的运营过程可表述为云制造服务平台根据用户的需求，在网上组织制造资源，为用户提供各类按需的，可随时获取的制造服务。服务的提供方可以将闲散的资源发布至云制造服务平台，服务的需求方通过云制造服务平台“租赁”服务并支付相应的费用，在云制造模式中这种共享的方式大大的提高了资源的利用率同时大大的降低了企业的生产成本，对整个制造业的向前发展起到了不可估量的影响。而云制造环境下资源调度是云制造模式中核心模块，调度方案是云制造模式的具体体现形式，调度方案的优劣直接影响用户对云制造服务质量的评价，调度指标的多样化和个性化是云制造环境下资源调度的特点，同时云制造环境下资源调度问题也是 NP 问题。云制造环境下资源调度研究意义主要有以下几方面：

首先，在理论方面，云制造作为 21 世纪前沿的制造新模式其理论融合了大数据，物联网，云计算等多种学科，同时引入服务、共享、个性化等概念，其理论本身就具有创新性。云制造环境下调度问题本身就是 NP 问题，调度指标的差异性必然导致调度方案的不同，云制造环境下根据指标不同对资源进行调度得到不同的优化调度方案，充分展示了云制造模式的“个性化”和“服务化”的特点，为云制造具体实践提供理论依据和支撑。

其次,在研究方面,云制造理论是在云计算、物联网的基础上构建并适用于我国现代制造行业的全新制造模式。云制造环境下资源调度问题是将云制造理论运用于现代制造业中,实现资源“绿色、共享、高效”的利用。云制造环境下资源调度较传统调度问题,其资源涉及领域更广,其应用领域更广,其服务对象多元,其完成效率更高,同时其调度过程亦更加复杂,扰动因素更加多样。在云制造环境下资源需求方可全程参与资源调度过程并对资源调度进行全生命周期的实时感知。但是在云制造资源调度过程中存在各类突发事件,干扰因素的影响。因此本课题主要从云制造环境下资源调度过程中针对制造任务出现的各类扰动因素和制造资源本身的各类扰动因素进行分析,模拟各类不同扰动因素存在下云制造平台“高效、智能”的适应扰动环境,给出相应的调度策略。因此,对云制造环境下资源动态调度问题进行进一步研究有助于云制造理论更好的与实践相结合。

最后,在应用方面,本文在国家自然科学基金项目的支持下,分析了云制造环境下资源调度过程极易受各类显性因素和隐形因素的影响,并在此基础上分别研究了基于制造任务需求变化,新制造任务接入,制造任务撤销等因素干扰下的资源调度问题与基于制造资源改变的调度问题。根据用户实际需求建立了以总制造服务时间,总制造服务成本,平均资源可靠度,平均资源服务效率为目标函数的调度模型,实现高效、快速的为用户提供最合适的调度方案。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 云制造研究现状

云制造作为一种制造的新模式,与时俱进将制造与网络相结合,用户可以通过互联网给网络服务平台发送相应的服务指令,然后服务平台根据用户的要求进行相应的资源调度,以此来满足用户的服务请求,云制造资源调度极大的提高了资源的利用率以及生产效率。近年来随着物联网、云计算[1]、制造网格[2]、web 语义等技术的进步,为现代制造业向智能化,个性化,服务化,高效低能化的方向发展奠定了基础。李伯虎院士于 2010 年提出了一种以物联网、云计算、制造网格为基础的制造新模式——云制造[3]。云制造理论的核心是基础设施即服务[4],软件即服务[5],制造即服务[6],平台即服务[7],专家即服务[8]。云制造模式由三个模块组成即资源服务方,资源需求方和云制造服务管理平台。在云制造模式下资源形式不再受物理距离约束,以网络数据的形式存在于云制造服务平台,制造任务同样以指令的形式发送到云制造服务平台,云制造服务平台根据用户需求按需为用户寻找最优加工资源。针对云制造理

论的研究,广大研究学者们主要集中在对云制造服务平台体系构建,云制造服务平台关键技术研究以及云制造服务平台的研发与应用推广。

(1) 云制造服务平台体系构建

云制造作为一种制造新模式其体系构架于 2010 年由李伯虎院士及其团队提出,在文献[9]中李伯虎院士分析目前各类制造模式局限性,如网路化制造模式是以固定的资源和既定的方案为用户提供服务缺乏动态性,同时缺乏智能化的客户端和有效的商业运行模式等,同时在文献[9]中指出了云制造模式的优越性,给出了云制造模式的体系构架由物理资源和能力层、感知层、虚拟资源层、制造云服务层、接口应用层 5 部分构成,其体系框架图如下 1.1 图所示。在文献[10]中康玲等根据云制造系统的 5 层构架模式提出了云制造 OWL-S 本体模型,进而构建了一种基于 Agent 的云制造服务协商机制,并从制造系统的角度建立了基于 Agent 的云制造系统 IDEFO 视图,从应用实践角度给出了基于 Agent 的云制造系统运行模式。在文献[11]中姚锡凡等分析了云计算,面向服务架构(SOA)和云制造三者间的关系,在云制造系统 5 层构架的基础上提出了通过接口和良好契约联系起来的,能够实现云制造环境下程序的不同功能的云制造服务构架(SOA4CM)。在文献[12]中姚锡凡进一步研究了事件驱动的面向云制造的服务架构,他将云制造看作是以云计算为控制器、以业务流程作为控制对象、以物联网感知为事件驱动系统,在体系结构上体现为“物联网+云计算+面向服务架构(SOA)+事件驱动构架(EDA)”的结合,同时面向事件驱动的云制造服务架构支持服务集成与事件驱动集成,具备情景感知、复杂事件处理和流程协同的能力,并可通过互联网交付按需即取的云服务。在文献[13]中崔立真,刘士军分析了在云制造模式中存在大量协同需求且在协同过程中普遍呈现出参与者多、协同链长、复杂多变的特征。如何借助云计算相关技术来创新制造服务模式并支持云制造服务体系中越来越多的大规模复杂协同过程,正面临如下两方面挑战:①如何协调云制造服务运营商、云制造服务提供商、云制造服务独立软件开发商(Independent Software Vendors,ISV)之间专业化、社会化的协作;②如何充分发挥云计算服务模式的优势,实现大规模复杂协同过程的快速建模和定制,满足不断涌现的个性化业务协同需求,鉴于以上问题崔立真,刘士军提出云制造 PaaS 平台架构。云制造体系架构的核心部分即物理资源 and 能力层、感知层、虚拟资源层、制造云服务层、接口应用层,云制造系统由人及基于云制造模式和手段所构成的云制造硬、软件系统组成。它实质是一种基于各类网络(组合)的、人-机-物-环境-信息深度融合的、提供制造资源与能力服务的智慧制造物联网。

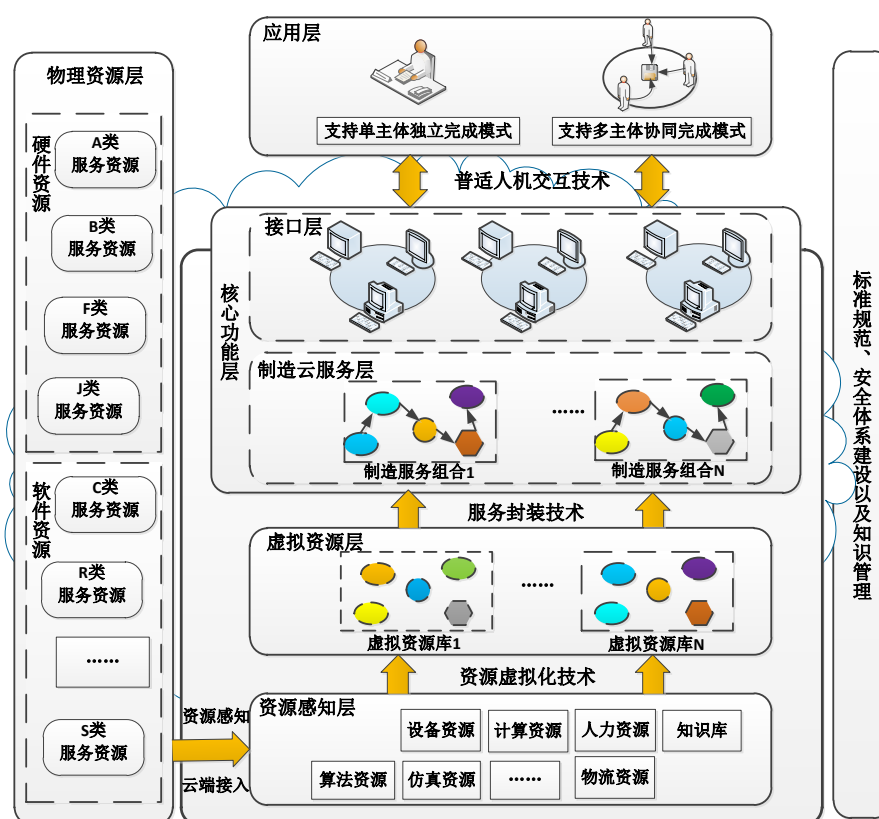


图 1.1 云制造体系框架

(2) 云制造服务平台关键技术研究

云制造服务系统要实现的功能有制造资源及能力的感知与接入功能，制造资源及能力的虚拟化和服务化功能，制造云服务管理功能，云服务交易与评估管理功能，跨领域多学科知识的管理功能，云制造服务系统按需构建功能，云制造服务系统运行管理功能，用户管理功能，制造流程业务管理功能，云端个性化人机交互功能，在文献[14]中张霖对云制造模式中的关键技术进行了概述，主要体现在资源分类与平台规范、资源感知和适配技术、资源虚拟接入技术、资源的云服务化技术，云服务的综合管理技术及支持可视化终端交互技术等方面。文献[15]中李成海等对如何实现云制造服务资源搜索智能、高效、便捷进行了深入研究，依据各行业标准词汇提出各行业的同义词字典，在用户进行资源关键字检索时智能化的为用户选择资源并且在已有研究成果的基础上设计了一种基于属性匹配的云制造服务资源搜索方法；文献[16]中盛步兵等在李成海等的研究基础上进一步深入研究，为了进一步提高中小企业的云制造搜索引擎的实用性，设计采用关键字语义智能搜索的面向中小企业云制造服务平台的供需智能匹配引擎。而在文献[17]中李颖新等人对云制造服务平台中的知识资源的特性及现阶段知识资源使用现状进行了详细的分析，针对目前云制造服务平台中对知识资

源使用个性化程度不高,用户粘合度低的问题,李颖新构建了云制造环境下的个性化的知识服务架构。云制造环境下硬件资源和软件资源的结构,功能等都需通过虚拟化技术接入云制造服务平台。在文献[18]中程臻等分析了云制造中制造资源的离散分布性、异构性、动态性、自主性、非实时性、可感知性,跨组织可组合性等特点,给出了制造资源虚拟化需求,并提出了基于本体的资源描述及虚拟化方法。文献[19]中马成等提出了一种模型驱动的联邦接入技术。在文献[20]中王正成等提出一种对复杂任务进行分解形成简单的有时序约束的任务,通过对简单任务进行资源匹配形成以复杂任务所需的资源集合,实现资源共享的技术。在文献[21]中甘佳等针对云制造服务交易过程中云制造服务需求方对云制造服务提供方是否具备能力完成云制造服务需求方的要求进行了分析,提出了一种基于交易经验、移动加权平均法和直接信任度预测的云制造服务信任评估技术。在文献[22]中林廷宇等采用模型自动组合技术对云制造环境中海量的服务模型进行管理,实现云制造环境下模型资源管理的高可扩展和按需组合。

(3) 云制造服务平台的研发与应用推广

云制造服务平台的研发目前我国主要有基于集团内部各不同单位之间实现资源共享和协作的私有云和基于中小型企业互利协作的公有云两种模式,通过对云制造服务体系构架及相关关键技术的研究,本节主要对不同的云制造服务平台的研发与应用推广进行相关阐述,不同的制造领域都有其相应的云制造服务平台。集团企业是我国制造业生产的基本单元,集团企业对制造知识资源的使用和需求有其独特的属性,文献[23]中李向前对集团企业的制造知识服务需求进行了分析,集团制造知识资源注重集团内部使用和共享,因此基于集团企业的云制造服务平台的构建主要是构建集团内部私有云制造平台,实现企业内部资源的共享。在文献[24,25]中林廷宇等在上文关于集团云制造模式的基础进一步分析了大型航天集团内部的资源构成,生产流程及资源的利用情况,指出目前大型航天集团的资源运转忙闲不均,共享程度不够,资源利用率较低的问题并结合云制造理论实践,将云制造理论运用于大型航天集团。提出了针对大型航天领域集团,旨在提高集团内部资源利用率及实现集团内部各单位资源的共享和协作的云制造服务构架模式。在文献[26]中宋庭新等提出的基于中小型企业的云制造服务平台则是以提高中小型企业核心竞争力为目标,在该云制造服务平台上多家不同的企业实现资源共享,多方协同共同完成多项任务。在文献[27]中刘日良将云制造理论运用数控加工领域,建立用于数控加工的云制造服务平台,极大的提高了加工效率。在文献[28]中王学文建立了基于煤矿装备的云制造服务平台。在文献[29]中顾新建面向模具行业建立了相应的云制造服务平台。在文献[30]中尹翰坤建立了基于汽摩零部件新产品开发的云制造服务平台。在文献[31]中闫洪波等在分析了目前市

场上相应生产非标准件的企业能力不足,管理落后,研究开发投入较低且单纯的机械化生产不能满足市场需求的基础上,提出构建面向非标准件的云制造服务平台。服务作为云制造模式的基本理念,在国外的相关研究中与云制造模式理念相同的研究主要有美国奥巴马政府于 2012 年提出“国家制造业创新网络计划”(National Network for Manufacturing Innovation (NNMI)),2013 年德国默克尔政府推出“Industry 4.0”战略,法国的新工业法国 (Nouvelle France Industrielle) 及斯洛伐克的智能工业 (Smart Industry)。

1.2.2 云制造环境下资源调度研究现状

云制造环境下资源调度问题的本质是一个 NP-hard 问题,其目的是将有限的服务资源合理地分配给不同任务,从而提高制造效率和资源利用率,云制造环境下资源调度的四重属性即制造任务、制造资源、优化目标、约束,这四者之间形成整体并相互影响。云制造服务平台根据四者关系形成完整的调度方案供服务需求方使用,服务需求方获得服务后对该次服务进行满意度评价,满意度高的资源其属性增强,反之属性减弱,资源的属性随着服务需求方的评价不断完成更新。云制造平台中任务,资源都有各自的属性。任务的属性一般为服务质量、服务成本、服务时间、交货期、服务满意度、服务可靠性、制造效率、负载度,工艺要求等等。资源的属性体现在资源与服务任务相匹配的基本参数,优化目标则一般以最小完工时间,最高服务满意度,最低服务成本等。在资源配置阶段云制造平台根据任务的各类属性以及资源的属性得到了最优的资源服务组合并对该组合中的资源进行封装供调度阶段使用。调度的过程既是根据任务属性(任务的优先级,任务加工顺序等)将封装完成的资源合理的安排到待服务的任务上。目前在国内外相关文献中云制造环境下资源调度研究主要集中在云制造环境下车间资源调度研究,云制造环境下资源搜索方法,云制造环境下基于调度模型的智能算法应用,云制造环境下资源动态调度研究四个方面,云制造环境下资源调度如下图 1.2 所示。

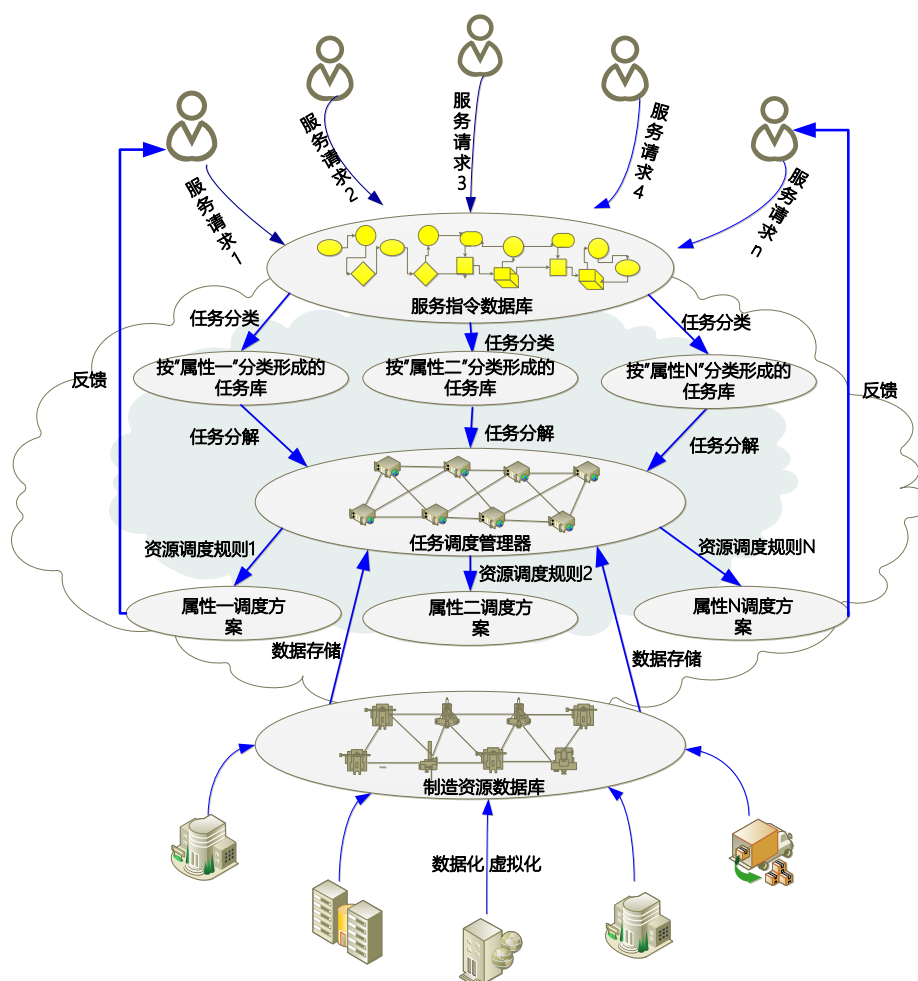


图 1.2 云制造环境下资源调度过程

(1) 云制造环境下车间资源调度

云制造车间资源调度问题是在传统车间资源调度的基础上对车间资源调度问题进行进一步深入研究，车间层资源调度是云制造环境下资源调度的基石，车间资源调度技术的发展为云制造环境下资源调度提供了强有力的技术支撑，云端的调度方案需到生产加工车间来完成相应的生产加工任务。云制造环境下资源种类更加多样化，资源管理方式更加高效合理，资源分布更加广泛，资源实时共享性更强，云制造理论与传统车间相结合形成云制造车间，这必然会产生新的待解决的问题，如：资源的动态响应能力，资源的调配等。针对云制造环境下车间生产调度不可预知性强，极易受外界事件干扰的特点许湘敏在文献[32]中提出事件驱动构架（EDA），即在车间环境下出现一种满足条件的事件系统会相应的产生一种处理方式，以此提高云制造车间动态响应能力；在文献[33]中 Jackson J. R 对动态事件的分类进行了细化，研究了机床设备突发事件和单机环境下加工零件连续达到的问题，提出了以滚动窗口为基础的再

调度技术；在文献[34]中 Tang Jianchao 等分析了在云制造柔性车间中任务的可用资源多样同时相同资源具备多种加工性能的特点，指出在柔性车间中是资源调度问题更加复杂和多样，提出一种结合了粒子群与遗传算法相结合的混合算法，用于解决云制造柔性作业车间调度问题。在文献[35]中 Li X 等研究了云制造混合车间即多种类型车间协同工作的调度问题，建立了基于工序成本的云制造混合车间调度模型，提出了一种两级阶梯结构的混合生物地理学的优化算法实现对该问题的求解。

综合上述文献目前针对云制造环境下的车间资源调度问题主要集中在优化车间的资源调度策略，优化调度算法，建立不同车间调度模型以解决车间资源调度问题等。其局限性在于研究的对象往往是一个车间或者企业内部若干个车间之间的资源调度问题，对于不同企业车间之间进行的资源共享的研究尚未完整，同时把企业作为云服务提供者和云服务需求者的研究还要继续深入研究。

(2) 云制造环境下资源搜索方法

云环境下的资源调度的过程，主要由两部分构成，即选择最优云组合和制造资源的快速匹配与搜索。资源的搜索与匹配是进行资源调度的前提，通过资源搜索系统能反馈给我们空闲有效的可利用的资源，通过快速进行资源搜索、匹配可以保证得到最合适的云服务组合，云制造的核心思想是制造即服务[36]，如何快速、高效的匹配，搜索到合适的制造资源，以最快的速度为用户提供最优的云调度方案是国内外学者研究的重点。

在文献[37]中 Fu J 设计了一种新的优化资源搜索方法，通过计算任务和资源的间隔距离来寻找所需的最佳制造资源；在文献[38]中 Marouane Kessentini 等通过建立了结合结构和句法指标的需要在一个由很多单元组合组成的搜索空间内进行的元模型来解决资源搜索问题。在文献[39]中 Wang J H 提出一种基于映射的树的相似度算法，该算法用来匹配在本体彼此相似的概念树，从而达到整合语义网中的各种信息的目的。在文献[40]中 Tai Lijun 等在分析制造资源和需求特性的基础上，提出一种综合语义距离、性能、结构和实施的相似度算法，遵循“多级匹配，逐步细化”的原则，实现供给和需求的智能匹配；在文献[41]中 Nikolaos Trokanas 等人提出了一种基于知识建模和本体的用来解决输入和输出匹配的语义法；在文献[42]中 Tekli J 则提出了一种旨在减少用户在执行匹配任务时的工作量的自动 XML 语法匹配和比较的方法；在文献[43]中 Lartigau J 等针对环境约束提出一种将定单分解成多个任务并选择多个供应商执行的方法，来完成云制造资源的优化配置，该类方法很好地解决制造资源与服务请求之间的匹配问题。

综合上述文献目前的研究中对云制造环境下的资源搜索和匹配方法大都对实际因素考虑不足，所提出的方法都是结合某一具体实例来验证算法的可行性，缺乏普遍

适用性,在实际生产制造中不确定因素居多,突发事件会时常发生,这些都会成为目前所提资源搜索算法在实际应用的过程中的难以解决的难点。

(3) 云制造环境下基于调度模型的智能算法的应用

云制造环境下的资源调度是云制造的重要一环,调度策略的选择直接影响云服务的服务质量,资源调度的本质是一个合理安排制造资源进行生产制造的过程,达到最大化提高制造资源的利用率,因此对调度策略的选择就显得尤为重要。智能算法在云制造环境下资源调度中应用的十分广泛,如遗传算法[44,45]、人工蜂群算法[46]、元启发式算法[47]、改进蛙跳算法[48]、蚁群算法[49],粒子群算法[50]等。文献[51]针对云环境下制造资源的组织和优化过于复杂的问题,提出一种基于改进的分布式遗传算法用来选择最优制造资源组合,该算法通过将分布式优化过程分成几部分来完成,不仅保证了算法的运行速度同时也扩大了搜索范围,提高了精度;在服务中云资源使用者会向云平台传递相应的服务指令,而云平台会根据算法智能的将客户服务指令分解成若干子指令,而在文献[52]中 ZHOU Jiajun 等提出混合人工蜂群算法来解决混合云中的资源调度问题;在文献[53]中 ZHENNG Hao 等提出了一个综合资源服务选择的方法用以协助请求者获得最佳的制造服务,并对云制造中资源服务选择问题进行总结。提出了一种基于云制造中服务质量描述的模型和一种基于模糊理论的服务质量计算模型,基于上述模型,采用粒子群优化算法选择最佳的服务组合;文献[54]中 Liu Yongkui 等根据云制造允许多个用户同时向云制造平台提交需求任务,制造服务的集中管理和操作使云制造能够并行处理多个制造任务。因此,云制造的一个重要问题是如何优化调度多个制造任务,以获得更好的云制造系统性能。任务负载是云制造任务调度的重要基础,基于此思想,刘永奎提出了一个云制造多任务调度模型,该模型将任务负载建模和服务质量系数和服务数量等服务的其他基本要素结合起来,然后研究了基于不同工作负载的任务调度方法对系统性能的影响,如总完工时间和服务利用率,并用不同的算法对该模型进行了求解。

综合上述文献在云资源服务的调度中研究者们都是在相对简单的环境下进行资源调度的研究,根据云制造环境中不同的影响因素来研究调度问题,并在理论情况下进行了验证,实际上云制造调度的过程是一个不可控的操作过程,在资源调度的过程中会遇到很多的问题,例如服务执行被耽搁,物流运输故障等问题,云制造环境下的资源存在地域上的差异性,不同企业之间进行资源信息交流时存在运输时间和成本的差异,这都是在未来进行云资源调度研究的方向。

(4) 云制造环境下资源动态调度

云制造环境下资源调度是云制造理论的核心部分,是云制造理论与实践结合的桥梁。调度的过程既是云制造服务平台作为“大脑”思考并实践的过程。调度方案即是云

制造服务平台根据服务需求方的任务需求智能化的选择资源并给出不同任务的服务开始时间与服务结束时间。云制造服务平台的“大脑”功能还体现在应对环境中的复杂干扰因素时能够自行思考后给出合理调度策略。

在文献[55]中李京生面对异地分布多车间协同生产计划的关联协调问题，基于云制造技术中面向服务的思想，提出并建立了一种以云制造思想为指导的基于动态制造资源能力服务化的分布式协同生产调度技术。在文献[56]中邵丽君提出了一种将调度分为适时调度和周期性调度两种模式并提出关联树技术用于分析调度过程中受影响的子任务，采用遗传蚁群算法对模型进行有效求解。在文献[57]中唐海波等研究了云制造环境下制造资源海量，异构等特点，构想出基于资源负载均衡的动态调度策略，建立以完成任务的总服务成本最小为最优的优化目标的模型；在文献[58]中 Jian,C.F 等根据云制造中的批量处理调度任务时具有动态性、实时性和大数据并发性和交换性需求的特点，为了有效地节约时间，降低车间生产成本，提出了一种优化模型，利用改进的粒子群优化算法解决任务调度问题；在文献[59]中 Zhou L 等分析了云制造环境下调度问题的复杂性和动态不确定性，建立了在动态环境下的服务调度模型和离散事件系统仿真模型，同时对云制造环境下制造任务的多样性和个性化进行了研究，提出了基于动态数据驱动仿真的调度方法。

综合上述文献，目前研究人员对云制造环境下资源调度中多类扰动事件同时存在研究比较匮乏，目前相关文献在研究云制造环境下资源调度问题上，焦点主要集中在如下方面：①根据不同调度指标实现多目标优化，得到最优的调度方案。②结合不同算法优点对调度问题进行优化。③引入动态驱动机制，实现云制造环境下资源的动态调度。

1.3 云制造环境下资源动态调度研究的必要性

通过上文对云制造调度问题相关文献的研究，目前大量文献的研究焦点主要集中在云制造环境下车间调度，云制造环境下资源搜索方法以及结合智能算法求解相关调度优化问题，而对云制造环境下资源动态调度问题研究匮乏，在云制造模式中资源种类繁多且分布于不同位置，资源在云制造系统中以数据形式存储其状态是实时变化表现出很强的动态性，同时在云制造服务平台中当某些资源出现撤销，维护，新增任务，任务撤销等突发状况后，云制造服务平台对制造任务的服务不会停滞，云制造服务平台会智能的为任务寻找到新的可用资源且用户还能实时参与制造任务的制造，这种主动服务的特性亦是云制造模式的典型特征，在复杂多变动态性极强的云制造模式中面对实时变化的资源状态与制造任务状态，对动态调度进行研究能极大的改善系统柔性

同时提高云制调度系统实时反映的能力。

1.4 本文研究内容

论文的组织结构共分为六章，每章具体内容如下：

第一章：对本文研究内容的意义与背景进行了阐述，对云制造理论进行了回顾，同时阐述了云制造理论及其相关技术现阶段研究现状并引出本文的研究内容。对现阶段云制造环境下资源调度问题的研究进行了回顾，分析了当前云制造环境下资源调度仍存在的问题，对本文的主要研究内容进行了概述。

第二章：对云制造环境下资源调度问题的复杂性进行了分析，对待执行制造任务在云制造调度全生命周期中的存在的几类干扰事件进行了分析，建立了以总制造服务时间，总制造服务成本，平均制造服务质量，制造资源负载均衡度为优化目标的多目标优化调度模型。

第三章：针对第三章提出的多目标优化调度模型采用多层编码的遗传算法完成对该模型的求解，采用层次分析法确定各优化指标的权重，并借助 Matlab2016a 仿真实现对调度全生命周期中出现若干类干扰事件进行模拟。

第四章：对云制造环境下制造资源在云制造调度全生命周期中存在的几类干扰事件进行了分析，建立了以总制造服务时间，总制造服务成本，制造资源平均服务效率，制造资源平均可靠度为优化目标的多目标优化调度模型。

第五章：针对第四章建立的云制造资源在调度全生命周期中出现的若干类干扰事件的多目标优化模型，采用改进粒子群算法实现对该问题的求解，并借助 Matlab2016a 仿真实现对调度全生命周期中出现若干类干扰事件进行模拟。

第六章：对本文的研究内容进行了总结，阐述了本文提出的观点，并对未来的研究方向进行了展望。

1.5 本章小结

本章首先对本文研究内容的研究背景与研究意义进行了阐述，然后对云制造理论及其相关技术的发展进行了回顾，指出了现阶段云制造环境下资源调度尚存在的问题，对云制造环境下进行资源动态调度研究的必要性进行了论述，最后对论文的主要组织结构进行了概述。

第2章 基于云制造任务变化的资源动态调度建模

云制造环境下制造任务具有多粒度性,大规模性,复杂性,动态性等特点。云制造环境下资源动态调度是云制造模式的核心内容,因此,本章对云制造环境下制造任务的各类突发干扰事件进行分析,建立了基于任务变化的资源调度模型,使云制造服务平台快速,高效的动态响应,并给出任务变化后的调度方案。制造任务的动态性主要体现在制造任务需求变化、新制造任务加入及相关制造任务的撤销等。

2.1 云制造任务

云制造模式中制造任务以服务指令的形式发送至云制造服务平台,制造任务具有多粒度性,大规模性,复杂性,动态性等特点。云制造服务平台中的制造任务粒度各异,平台需通过任务分解技术对一级制造任务进行分解形成可加工服务的二级制造任务序列,然后通过资源匹配技术智能的为二级制造任务匹配相应的可用资源并形成候选资源集合,最后通过制造任务信息相关描述为制造任务调度相应资源。

2.1.1 云制造任务信息描述

(1) 制造任务基本信息

云资源与云制造任务都以数据形式存储于云制造平台,云环境下制造任务的基本信息是云平台为其检索云资源的依据,云环境中云制造任务的基本信息一般包括制造任务的约束信息,制造任务的功能信息,制造任务的标志信息及制造任务的服务信息等,云平台中的制造任务集 H 的基本信息可用一个多元信息组表示 $H_{information} = \{H_{constraint}, H_{optimization_objective}, H_{name}, H_{source}\}$, 其中 $H_{information}$ 表示制造任务集 H 的基本信息集合, $H_{constraint}$ 表示制造任务集 H 约束信息, $H_{optimization_objective}$ 表示制造任务集 H 的功能信息即优化目标, H_{name} 表示制造任务集 H 的标志信息等, H_{source} 表示制造任务的服务信息。

(2) 制造任务结构

云制造环境下制造任务具有多粒度性、大规模性、复杂性、耦合性,动态性等特点。制造任务结构是云制造系统有序完成制造任务的关键信息。云制造任务在云制造平台中经过任务分解技术实现由“大”任务向“小”任务转化,分解完成的标准是所有“小”任务有相应的资源提供服务。云制造服务平台中初始任务集合 $H_1 = \{F_1, F_2 \cdots F_i \cdots F_n\}$ 由 n 个一级制造任务构成, F_i 表示一级制造任务; F_i 经任务分解后可分解为 k_i 种二级制造任务, 即 $F_i = \{F_{i1}, F_{i2} \cdots F_{ij} \cdots F_{ik_i}\}$, 其中 F_{ij} 表示制造任务 F_i 的第

j 个二级制造任务。制造任务集 H_1 、一级制造任务 F_i ，二级制造任务 F_{ij} 的关系图如下图 2.1 所示。

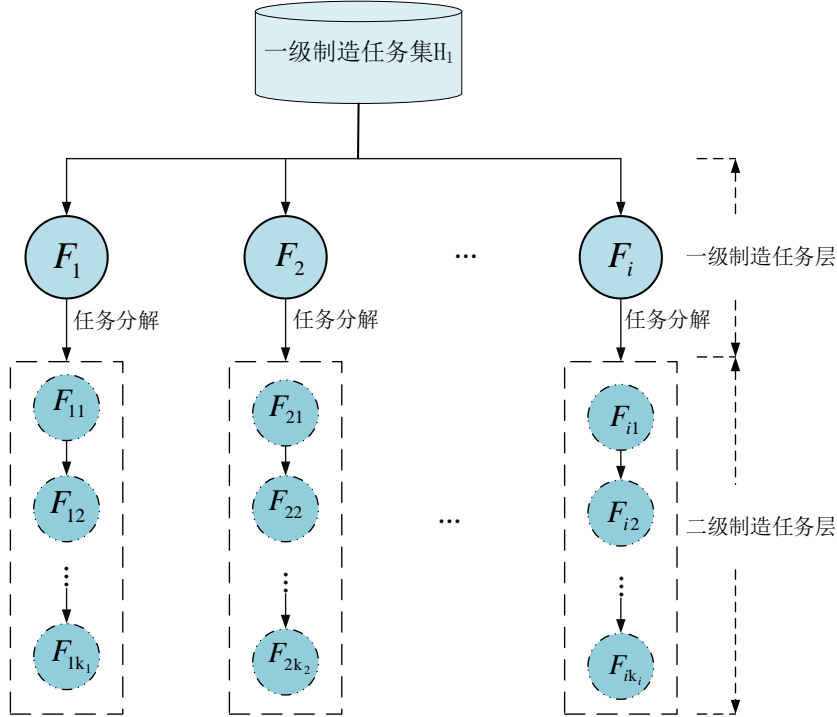


图 2.1 各级制造任务关系图

2.1.2 云制造任务动态性分析

云制造服务系统是集合了云计算，物联网等的综合服务平台，云制造环境下制造任务的动态性从任务到达的角度体现在用户的服务指令不间断到达云制造服务平台，云制造服务平台不断接受，处理相应的服务申请，体现了任务到达的连续性；从任务突发情况的角度体现在云制造平台中的制造任务在执行服务过程中发生任务执行进度变化即任务撤销、任务属性改变或新任务接入，云制造服务平台根据相应突发状况智能调整，以适应当前系统环境。

2.2 基于云制造任务变化的资源动态调度问题描述

云制造服务平台中初始任务集合 $H_1 = \{F_1, F_2 \cdots F_i \cdots F_n\}$ 由 n 个一级制造任务构成，即 F_i 表示一级制造任务； F_i 经任务分解后可分解为 k_i 种二级制造任务，即 $F_i = \{F_{i1}, F_{i2} \cdots F_{ij} \cdots F_{ik_i}\}$ ， F_{ij} 表示二级制造任务；每个二级制造任务 F_{ij} 有多个候选制造资源，二级制造任务 F_{ij} 可随机在候选资源上进行执行。由于资源属性的区别，二级制造任务在不同资源上的执行时间，成本，服务质量会有差异，不同调度方案资源间负

载均衡度亦不同。云制造环境下资源具有分布性、多样性、抽象性、动态性和异构性等特点。不同的资源可能属于不同的企业，故资源与资源之间的物理距离会导致一级制造任务的多个二级制造任务在执行过程中产生相应的物流时间和物流成本。云制造环境下资源调度的本质即为各类任务选择最合适的资源，并给出资源在任务上的服务顺序以及各资源服务的开始时间和服务结束时间，并使调度方案的各项优化指标达到最优。在云制造环境下资源调度的全周期中基于制造任务的变化有多种不同的扰动因素，其主要体现在新任务接入，制造任务的属性改变和任务撤销等。

(1) 新任务的加入

云制造服务加工过程中，初始任务集 H_1 中各制造任务在云制造服务平台的统一调度下在不同资源节点上进行有序服务，云制造服务制造周期的 t_1 时刻，制造任务集合 $G = \{F_{n+1}, F_{n+2} \dots F_{n+r}\}$ 到达云制造服务平台，在 t_1 时刻初始任务集 $H_1 = \{F_1, F_2 \dots F_i \dots F_n\}$ 中部分未完成的任务构成制造任务集 $H_{unfinished}^1$ ，此时将制造任务集 $H_{unfinished}^1$ 与新接入的任务集 G 组合构成新的制造任务集 $H_2 = \{H_{unfinished}^1, G\}$ ，云制造服务平台针对新的任务集合 $H_2 = \{H_{unfinished}^1, G\}$ 继续进行调度服务。

(2) 任务撤销

在云制造服务制造周期的 t_2 时刻，用户对某些制造任务进行撤销，被撤销任务占用的资源解封，可服务于其他制造任务，在 t_2 时刻制造任务集 H_2 中未完成的任务构成制造任务集 $H_{unfinished}^2$ ，令制造任务集合 $H_{unfinished}^2 = H_3$ ，云制造服务平台根据制造任务集合 H_3 继续进行调度。

(3) 任务属性变化

在云制造服务制造调度的 t_3 时刻，用户对制造任务集合 H_3 中若干任务的服务预期目标进行修改，在 t_3 时刻制造任务集 H_3 中未完成的任务构成制造任务集 $H_{unfinished}^3$ ，令制造任务集合 $H_{unfinished}^3 = H_4$ ，云制造服务平台根据属性变化后的制造任务集 H_4 继续进行调度。

为了便于分析本文作如下相关调度规则：

Rule 1: 每个制造资源能独立完成一项或几项二级制造任务，同一项二级制造任务在同一时刻不可被不同制造资源加工；

Rule 2: 一级制造任务分解后形成二级制造任务，二级制造任务为最小待服务单元；

Rule 3: 二级制造任务 F_{ij} 与下一个二级制造任务 $F_{i(j+1)}$ 在不同制造资源之间加工制造会产生一定的物流成本与物流时间；

Rule 4: 任务的服务方式是按二级制造任务前后次序有序接受服务, 后一项二级制造任务的开始时间不小于前一项二级制造任务结束时间与两个二级制造任务所选资源之间的物流时间之和;

Rule 5: 不同资源之间的物流成本与物流时间与物流距离成正比;

Rule 6: 不同类型的一级制造任务执行优先级相同;

Rule 7: 在零时刻所有云制造资源均可用;

Rule 8: 二级制造任务 F_{ij} 一旦开始加工后直至其制造服务完成, 期间不可中断。

2.3 云制造资源调度指标建立

调度指标是云制造环境下资源调度问题的基本特征, 调度指标确定了所研究调度问题需实现的基本目标。云制造调度系统主要由用户即资源需求方, 资源提供方, 资源管理方即云服务平台三部分构成。从资源需求方的角度其往往需要成本低、时间短, 服务质量好的服务; 从服务管理方的角度其往往侧重既满足用户的需求同时需要兼顾均衡资源池中的各资源的负载度; 从资源提供方的角度其往往需求自身资源尽可能多的被利用从而带来更好的收益, 因此, 在云制造调度问题中因利益方的出发点各异, 各优化目标往往是不一致甚至是矛盾的。本文通过对部分相关文献进行研究的基础上, 对不同文献所选取的优化目标进行了归纳如表 2-1 所示, 不同指标被引用的次数如图 2.2 所示。

表 2-1 不同文献所选优化指标

文献	优化目标
[60][61]	服务时间
[58]	服务时间, 可靠度
[62]	服务成本
[63]	服务时间, 服务成本
[64]	服务时间, 服务成本, 资源负载均衡度
[65][66]	服务时间, 服务成本, 服务质量
[56]	服务时间, 服务成本, 服务质量, 制造能力
[67]	服务时间, 服务成本, 服务质量, 资源利用率

通过图 2.2 的统计结果可以看出制造服务时间与制造服务成本作为基本优化目标被选择的次数最多, 制造服务质量, 资源负载均衡度, 资源利用率及资源制造能力等相关指标亦被选择。通常制造服务时间与制造服务成本是调度问题中最主要的优化指标。从市场角度出发, 在满足资源分布和加工能力等约束的条件下, 本文选择总制造

服务时间，总制造服务成本，平均制造服务质量及资源负载均衡度作为优化指标。

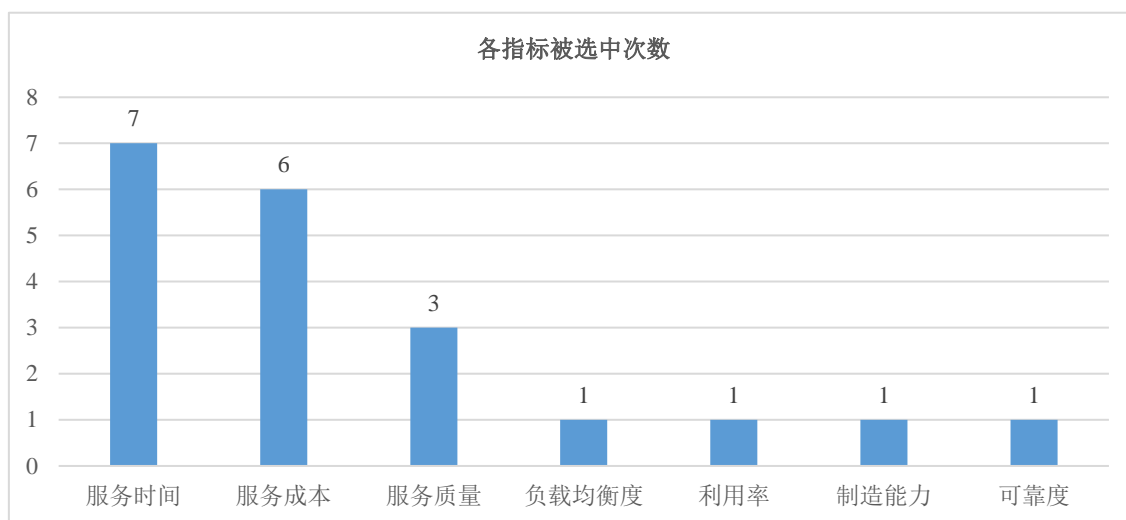


图 2.2 不同文献中各指标被选中次数统计

2.4 基于云制造任务变化的资源动态调度数学模型

2.4.1 数学符号及其描述

本文以制造任务总制造服务时间 (T)，总制造服务成本 (C)，资源负载均衡度 (MRL)，平均制造服务质量 (Q) 为优化目标。 x_{ijp} 为决策变量，如下式所示：

$$x_{ijp} = \begin{cases} 1 & \text{表示资源 } p \text{ 服务于二级制造任务 } F_{ij} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (2-1)$$

模型相关物理量进行定义如下表 2-2 所示：

表 2-2 各物理量的意义

物理量	代表意义
Q	平均制造服务质量
T	总制造服务时间
C	总制造服务成本
MRL	资源负载均衡度
L_p	资源 p 的负载度
Q_{min}	用户规定的最低服务质量
T_{max}	用户规定的最晚交货期
C_{max}	用户规定的最高服务成本

n	任务总数
F_i	第 i 个一级制造任务
F_{ij}	第 i 个一级制造任务的第 j 个二级制造任务
k_i	第 i 个一级制造任务的二级制造任务数目
x_{ijp}	决策量（资源 p 是否处于加工状态）
t_{ijp}	二级制造任务 F_{ij} 在资源 p 上的服务加工时间
t'_{ijp}	二级制造任务 F_{ij} 在资源 p 上的物流时间
c_{ijp}	二级制造任务 F_{ij} 在资源 p 上的服务加工成本
c'_{ijp}	二级制造任务 F_{ij} 在资源 p 上运输成本
m_{ij}	二级制造任务 F_{ij} 的候选资源数

2.4.2 优化目标

（1）总制造服务时间

总制造服务时间是指从制造服务开始到制造任务中最后一个二级制造任务完成的时间。总制造服务时间的目标函数表达式如下：

$$T = \text{Max}\{F_{ij_end} | i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2 \dots k_i\} \quad (2-2)$$

F_{ij_end} 表示任务 F_i 的最后一个二级制造任务的完成时间。

（2）总制造服务成本

云制造服务平台的收费方式是按时计费，不同服务资源的收费标准各不相同，同一类型的服务资源根据资源的优劣其收费标准各异。在云制造资源池中存在大量同一类型的服务资源，此类资源都能为某一任务提供所需服务，“优等”资源效率高，加工周期短，收费相应高；此时，应从服务成本考虑，为用户选择最合适的服务资源。因此，制造服务成本最优不一定是为用户选择最好的资源而是为用户选择最合适的资源。制造服务成本包括制造二级制造任务 F_{ij} 的制造加工成本，二级制造任务 F_{ij} 与下一个二级制造任务 $F_{i(j+1)}$ 在不同服务资源之间的物流成本。在云制造环境下资源调度中云制造服务平台给用户提供的制造资源应满足总制造服务成本最少。总制造服务成本其目标函数表达式如下：

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{p=1}^{m_{ij}} x_{ijp} (c_{ijp} + c'_{ijp}) \quad (2-3)$$

c_{ijp} 是表示制造任务 F_i 的第 j 个二级制造任务 F_{ij} 在资源 p 上的加工成本， c'_{ijp} 表示二级制造任务 F_{ij} 在资源 p 上运输成本。

（3）平均制造服务质量

制造服务质量反映的是云制造资源在进行云制造服务后用户对云制造服务的综合评价，主要靠用户的满意度来体现，参考文献[68]中对制造服务质量的描述与定义，本文选取平均制造服务质量作为优化目标，其反映的是用户对所有参与云制造服务的资源的综合满意度。平均制造服务质量目标函数表达式如下：

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{p=1}^{m_{ij}} x_{ijp} Q_{ijp}}{nk_i} \quad (2-4)$$

Q_{ijp} 表示资源 p 对二级制造任务 F_{ij} 的服务质量。

(4) 制造资源负载均衡度

本文中每个一级制造任务的每项二级制造任务都有若干候选服务资源，属性优良的资源会被不断的选择，导致资源的负载过大，影响资源的使用寿命，因此必须对资源的负载度进行相关约束，云制造环境下制造资源的负载度表示资源实际工作的时间与理论最大载荷的比值，制造资源负载均衡度目标函数其表达形式如下：

$$L_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{p=1}^{m_{ij}} t_{ijp}}{Ca_s} \quad (2-5)$$

$$\bar{L}(\theta) = \frac{\sum_{p=1}^h \sum_{p=1}^{m_{ij}} x_{ijp} L_p}{h} \quad (2-6)$$

$$MRL = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^h \sum_{p=1}^{m_{ij}} x_{ijp} (L_p - \bar{L}(\theta))^2}{h - 1}} \quad (2-7)$$

其中 L_p 表示资源 p 的负载度， Ca_s 表示资源的理论可工作时间， h 表示参与执行任务的资源数量， $\bar{L}(\theta)$ 表示整体资源的平均负载， MRL 表示整体资源的负载均衡度。综上所述，云制造环境基于任务变化的动态调度总目标函数表达如下：

$$F(x) = W_1 f_1(x) + W_2 f_2(x) + W_3 f_3(x) + W_4 f_4(x) \quad (2-8)$$

$f_1(x)$ 表示总制造服务时间目标函数， $f_2(x)$ 总制造服务成本目标函数， $f_3(x)$ 表示平均制造服务质量目标函数， $f_4(x)$ 表示资源负载均衡度目标函数。

2.4.3 约束条件

(1) 制造执行时间约束：

任务的总完成时间不可超过规定的最晚交货期即：

$$T = \text{Max}(T_{ij_end}) \leq T_{max} \quad (i = 1, 2 \dots n; j = 1, 2 \dots k_i) \quad (2-9)$$

T 表示制造任务完成时间， T_{max} 表示用户规定的最晚交货期。

(2) 制造服务成本约束:

制造服务成本不能超过用户规定的最高服务成本即:

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{p=1}^{m_{ij}} x_{ijp} (c_{ijp} + c'_{ijp}) \leq C_{max} \quad (2-10)$$

C_{max} 表示用户规定的最高服务成本。

(3) 平均制造服务质量约束:

制造资源的平均服务质量不低于用户规定的最低服务质量:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{p=1}^{m_{ij}} x_{ijp} Q_{ijp}}{n k_i} \geq Q_{min} \quad (2-11)$$

Q_{min} 为用户规定的最低服务质量。

(4) 制造资源负载度约束:

$$L_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{p=1}^{m_{ij}} t_{ijp}}{C a_s} \leq 0.8 \quad (2-12)$$

(5) 二级制造任务加工时序约束:

任务的服务方式是按二级任务的次序有序接受服务, 后置二级制造任务的服务开始时间不小于前置二级制造任务的任务结束时间与这两个二级制造任务所在资源间的物流时间之和即有:

$$\text{Max}(t_{end_{ij}} + t'_{end_{ij}}) \leq t_{start_{i(j+1)}} \quad (2-13)$$

$t_{end_{ij}}$ 表示二级制造任务 F_{ij} 的完成时间, $t'_{end_{ij}}$ 表示二级制造任务 F_{ij} 与二级制造任务 $F_{i(j+1)}$ 所在资源之间的物流时间, $t_{start_{i(j+1)}}$ 表示二级制造任务 $F_{i(j+1)}$ 的任务开始时间。

(6) 二级制造任务的粒度约束:

任务分解后形成的二级制造任务为加工最小单元粒度, 每个制造资源能独立完成一种或几种类型二级制造任务, 同一个二级制造任务在同一时刻不可被不同制造资源加工, 即有:

$$\sum_{p=1}^{m_{ij}} x_{ijp} = 1 \quad (2-14)$$

2.5 本章小结

本章主要介绍了云制造任务及云制造资源的信息化描述, 对本文研究的任务结构类型进行了描述, 介绍了云制造环境下基于制造任务的多目标动态调度的三种影响因素即新任务加入、任务需求属性变化及任务撤销, 给出了在云制造环境下资源动态调

度约束的相关概念，最后以任务总制造服务时间，总制造服务成本，制造服务满意度与制造资源负载均衡度为优化目标建立了多目标优化模型。

第3章 基于云制造任务变化的资源动态调度仿真

云制造环境下动态调度即是将调度全生命周期看成连续的制造过程,云制造服务平台根据制造任务的具体需求为制造任务安排最合适资源以达到用户最佳的期望,在基于任务变化的调度全生命周期中,会发生新增制造任务,制造任务撤销,制造任务需求发生变化等突发情况,为了按照用户需求完成相关任务,需要云制造服务系统及时更新调度策略,最大化完成制造任务并达到用户期望,为此,本章中采用基于多层编码的遗传算法用于求解云制造环境下制造任务发生变化的资源调度问题。

3.1 遗传算法

遗传算法于上世纪70年代由美国 John H. Holland 教授及其助理提出,其借鉴了自然界中生物通过自然选择和种群遗传促进种群进化演变这一基本原理,通过对种群中不同染色体间的交叉互换与同一染色体中基因突变促进种群产生更多类型的新的适应度更好的新个体。在运用遗传算法对问题进行求解时,种群中的每一个染色体代表了问题的一个可能解,算法通过模仿生物遗传的规律,以适应度值作为衡量个体优劣的标准,以一定的比率从种群选择部分优秀个体进行染色体交叉,变异操作,不断筛选优秀个体,如此循环往复使得所求问题解不断靠近最优解,遗传算法的主要内容有以下几方面:

(1) 适应度函数的构造

在自然界中衡量某一生物种群其生命力是否顽强其中一个重要的标准是该种群是否有较强的环境适应能力,遗传算法借鉴了生物遗传进化的思想,因此“适应度”亦成为遗传算法中衡量种群个体接近最优解的程度,度量种群中个体适应度的函数称为适应度函数,适应度函数值就是该个体接近最优解的程度,因此适应度函数是衡量种群个体优劣的标尺。在实际中,需根据问题的定义确定一个目标函数,确定目标函数的类型即目标函数是求最大值还是最小值问题,然后通过目标函数和适应度函数的相互关系构造出适应度函数。

(2) 编码

遗传算法中的染色体是一种数据结构,是计算机能识别的一种语言,编码是实现解空间转换的有效途径,因此在使用遗传算法进行问题求解时首先需要对问题进行解空间转换,亦即将实际问题的解空间转化为计算机能识别的解空间,常见的编码操作有二进制编码,浮点数编码和符号编码。

(3) 遗传算子

遗传算子是遗传算法进行种群更新和求解最优值的核心，主要的遗传算子有选择算子、交叉算子及变异算子，选择算子对种群中的个体进行选择，部分适应度值高的个体被保留并作为父代参与种群更新，适应度评价较差的个体则被淘汰；交叉算子是种群产生新个体的主要方式，其按较大的概率通过在种群中选择俩个染色体作为父代和母代进行交叉操作，新产生的个体继承了父代与母代的优点，其表现出更强的适应能力，因此，交叉算子是种群进化，收敛的强大推动力；变异算子是种群产生新基因的有效方式，其通过在某条染色体的某个部位用该部位的等位基因对该部位原先基因进行替换，从而形成新的个体，进行交叉操作既可以防止算法陷入局部最优同时又能保证种群的多样化。遗传算法在选择算子，交叉算子，变异算子的共同作用下经过种群一代代的更新，最终收敛于最适应环境的某个个体，遗传算法基本流程图如下图 3.1 所示。

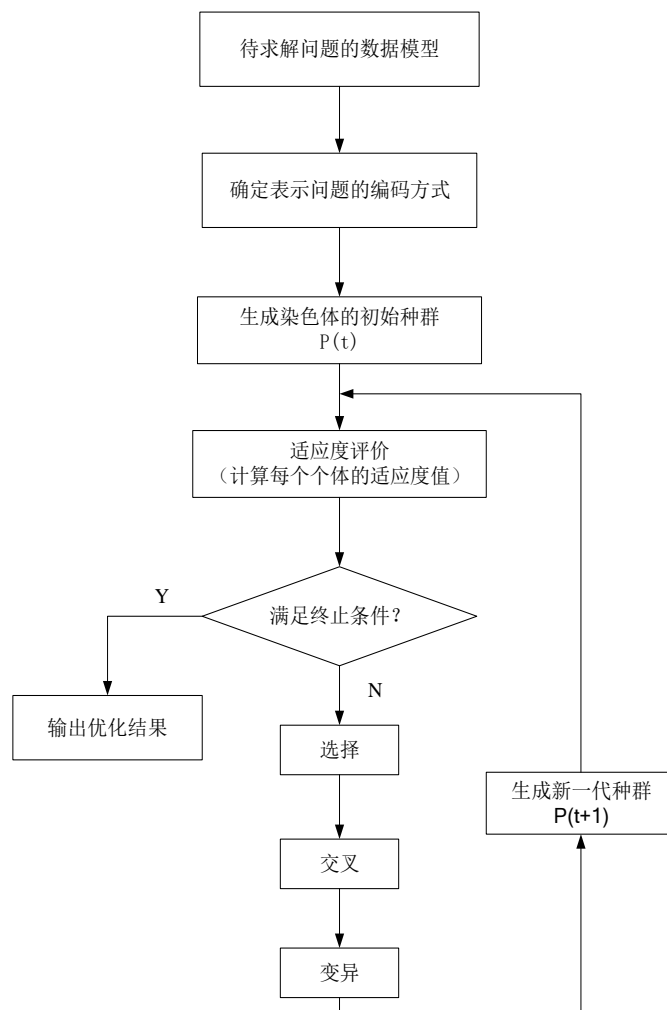


图 3.1 遗传算法流程图

遗传算法基本流程如下：

Step 1 通过待求解问题的模型，确定算法的编码方式，并对算法进行初始化处理，产生初始种群；

Step 2 通过适应度函数计算种群中每个个体的适应度值，并对个体进行适应度评价。

Step 3 通过选择算子选择种群中部分优秀个体；

Step 4 按交叉概率，通过交叉算子选择种群中的个体进行交叉；

Step 5 按变异概率，执行变异算子；

Step 6 种群经过上述 Step 3，Step 4，Step 5 后形成新一代种群；

Step 7 终止条件，判断算法是否到达设定条件，若达到设定条件则算法结束并输出此时最优结果，若不满足算法终止条件则返回上述 Step 2 继续执行。

3.2 基于层次分析法的权重计算

云制造环境下资源调度问题中资源需求方对调度方案的制造时间，制造成本，制造服务质量，制造资源负载均衡度等有不同的需求。不同的资源需求方对调度指标的需求各异，有些资源需求方认为制造时间最重要，有些则认为制造成本最重要等，本文采用层次分析法[69]对本文中的总制造服务时间，总制造服务成本，平均制造服务质量及资源负载均衡度的权重进行计算。

3.2.1 层次分析法基本原理

层次分析法（AHP, Analytic Hierarchy Process）是由T. L. Saaty 等人提出的一种两两指标因素互相比对的方式确定各个指标因素之间的相对重要性，以行为科学为依据，将决策者的经验知识数量化，具有能体现策略者主观性特点的分析方法。

3.2.2 层次分析法求解步骤

(1) 明确研究对象并对研究对象各层关系进行分析，确定目标层，准则层及方案层，根据目标层和准则层及方案层构建阶梯层次模型。

(2) 在同一层次中的不同影响因素的重要程度由决策方确定，为计算便利需要将“相对重要程度”这一抽象概念具体化，根据不同指标因素在决策方心中的重要程度参照表3-1，按标度1-9构建初始判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n} (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,n)$ ， n 表示同一层中指标因素的数量， a_{ij} 表示同一层次中指标因素 i 和指标因素 j 相对于上一层次某一元素的相对重要程度之比，例如 $a_{ij}=1$ 则表示 i 指标因素与 j 指标因素相对于其上一层因

素同等重要。

表3-1 判断矩阵元素标度表

标度	含义	标度	含义
1	因素 <i>i</i> 和 <i>j</i> 同等重要	2	重要程度于1-3之间
3	因素 <i>i</i> 较 <i>j</i> 略微重要	4	重要程度于3-5之间
5	因素 <i>i</i> 较 <i>j</i> 明显重要	6	重要程度于5-7之间
7	因素 <i>i</i> 较 <i>j</i> 强烈重要	8	重要程度于7-9之间
9	因素 <i>i</i> 较 <i>j</i> 极端重要		

(3) 根据构建的初始判断矩阵 A ，由矩阵的特性 $AW = \lambda_{\max} W$ 可知 W 为矩阵 A 的特征向量， λ_{\max} 为矩阵的特征值，对矩阵 A 做相应的数学转换即可求出特征值 λ_{\max} 和特征向量 W 。

①首先对矩阵 A 按列归一化处理，得到归一化标准矩阵 \bar{A} ；

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (3-1)$$

$$\bar{A} = (\bar{a}_{ij})_{n \times n} \quad (3-2)$$

②然后对 \bar{A} 中的元素按行相加，得到新的列向量 \bar{W} ；

$$\bar{W} = (\bar{w}_1, \bar{w}_2 \cdots \bar{w}_n)^T, \quad \bar{w}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \quad (3-3)$$

③最后对得到列向量 \bar{W} 进行归一化处理得到最终的权向量 W ；

$$W = (w_1, w_2 \cdots w_n)^T, \quad w_i = \bar{w}_i / \sum_{i=1}^n \bar{w}_i \quad (3-4)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \right] \quad (3-5)$$

由于在对一组指标元素进行重要度判断时，不可避免出现估计误差，这种误差必然导致各特征向量与特征值存在偏差，进而导致结果出现错误，因此要对判断矩阵进行一致性检验控制估计误差。

④计算一致性指标 CI 值：

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \quad (3-6)$$

由上式 (3-1) 至 (3-5) 可得 λ_{\max} ，通过式 (3-6) 可得一致性指标 CI 的值，当 $CI \leq 0.1$ 时，认为判断矩阵可以接受，否则需调整判断矩阵。

当判断矩阵维度越大,判断一致性将越差,因此引入平均一致性指标 RI 。如表3-2所示。

表 3-2 平均随机一致性指标 RI

阶数(n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.46	1.49

其中:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3-7)$$

当 $CR \leq 0.1$ 则判断矩阵的一致性可以接受。

3.2.3 权重计算

(1) 构造层次模型

通过上文对层次分析法求解权重基本原理的分析,结合本文中的研究对象构建以最优资源调度方案为目标层,总制造服务时间,总制造服务成本,平均制造服务质量和资源负载均衡度为指标因素层的阶梯层次模型,在本文中仅考虑第一层指标。

(2) 构造判断矩阵

本文基于层次分析法的原理及求解步骤,对调度模型中的影响因素采用层次分析法进行权重求解。本文中假定总制造服务时间最重要,总制造成本比平均制造服务质量重要,平均制造服务质量比资源负载均衡度重要。按照标度 1-9 构建如表 3-3 所示的初始判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。

表 3-3 目标层初始判断矩阵

	T	C	Q	MRL
T	1	2	2	3
C	1/2	1	2	2
Q	1/2	1/2	1	2
MRL	1/3	1/2	1/2	1

(3) 计算权重

按上文中①计算进行归一化处理后得到的标准矩阵 \bar{A} 如下表 3-4 所示

表 3-4 归一化标准矩阵 \bar{A} 矩阵

	T	C	Q	MRL
T	0.4286	0.5000	0.3636	0.3750
C	0.2143	0.2500	0.3636	0.2500
Q	0.2143	0.1250	0.1818	0.2500
MRL	0.1428	0.1250	0.0910	0.1250

按步骤②对归一化后的标准矩阵 \bar{A} 按行进行元素相加得到新的列向量 \bar{W} ;

$$\bar{W}=(1.6672, 1.0779, 0.7711, 0.4838)^T$$

按步骤③对 \bar{W} 进行归一化处理得到归一化后的列向量 W ;

$$W=(0.4168, 0.2694, 0.1928, 0.1210)^T$$

按步骤④计算判断矩阵 A 的最大特征值 λ_{max} ，并进行一致性检验;

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \right]$$

$$\lambda_{max} = 4.07118$$

根据公式 (3-6) 对所求权重进行一致性检验:

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)}$$

$$CI = 0.0237 \leq 0.1$$

由表 3-2 可查得在 $n=4$ 时，平均随机一致性指标 $RI=0.90$ ，根据公式 (3-7) 有:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

$$CR = 0.0264 \leq 0.1$$

故所求权重符合一致性检验。

本文所求权重为 $W=(0.4168, 0.2694, 0.1928, 0.1210)^T$

3.3 基于多层编码遗传算法的资源动态调度

遗传算法具有较强的问题求解能力，其每个染色体表示问题中的一个潜在最优解，多层编码的遗传算法把个体编码分为多层，每层编码均表示不同的含义，多层编码共同表达问题的解，从而用一个染色体准确的表达出复杂问题的解。本节中研究的云制造环境下资源调度包括资源层，一级制造任务层和二级制造任务层，资源层是二级任

务层的可选资源集合，二级制造任务层为任务的执行排序集合，二级制造任务层的每一个制造二级任务对应资源层中的可选资源，根据本文中的优化目标实现二级制造任务在资源上的排序构成不同的调度方案。

3.3.1 个体编码

编码的目的是实际问题向数学解空间转换以便于计算机识别，根据本文调度问题中一级制造任务间没有优先级关系，一级任务分解后形成的二级制造任务间存在执行顺序的特点，本文对染色体采用整数编码的方式进行编码，一个染色体代表问题的一个可行解，例如，在一次调度过程中待执行的一级制造任务总数为 n ，一级制造任务 F_i 由 k_i 个二级任务 F_{ij} 构成，首先在 1 到 n 的范围内对一级任务 F_i 进行编号，则染色体个体长度可表示为 $2\sum_{i=1}^n k_i$ 整数串。其中，染色体的前半部分表示所有一级制造任务的执行顺序，后半部分表示可服务于二级制造任务 F_{ij} 的资源编号。如个体 $[2\ 1\ 3\ 1\ 1\ 2\ 3\ 2\ 3\ |\ 5\ 3\ 1\ 3\ 3\ 2\ 4\ 1\ 4]$ ，其中前 9 位 $[2\ 1\ 3\ 1\ 1\ 2\ 3\ 2\ 3]$ 中数字代表一级制造任务的编号，如“2”代表编号为 2 的一级制造任务；编号“2”第几次出现则代表了编号为“2”的一级制造任务的第几个二级制造任务即染色体个体可理解为：

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 & 3 & 1 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & | & 5 & 3 & 1 & 3 & 3 & 2 & 4 & 1 & 4 \\ 201 & 101 & 301 & 102 & 103 & 202 & 302 & 203 & 303 & | & 5 & 3 & 1 & 3 & 3 & 2 & 4 & 1 & 4 \end{bmatrix}$$

在如，个体序列为 $[2\ 2\ 2]$ 其中的数字“2”代表了 2 号一级制造任务编号，当“2”第一次出现代表编号为 2 的一级制造任务的第一个二级制造任务即为 201，当“2”第二次出现代表编号为 2 的一级制造任务的第二个二级制造任务即为 202，以此类推。因此，个体编号为 $[2\ 1\ 3\ 1\ 1\ 2\ 3\ 2\ 3\ |\ 5\ 3\ 1\ 3\ 3\ 2\ 4\ 1\ 4]$ 的序列表达了编号为“1”，“2”，“3”的 3 个一级制造任务都由 3 个二级制造任务构成且在 5 个资源上的执行顺序，依次为一级制造任务 2→一级制造任务 1→一级制造任务 3→一级制造任务 1→一级制造任务 1→一级制造任务 2→一级制造任务 3→一级制造任务 2→一级制造任务 3；10 到 18 位表示服务二级制造任务的资源。依次为资源 5→资源 3→资源 1→资源 3→资源 3→资源 2→资源 4→资源 1→资源 4。其对应关系则为 5 号资源服务于编号为 2 的一级制造任务的第一个二级制造任务，3 号资源服务于编号为 1 的一级制造任务的第一个二级制造任务，以此类推，染色体个体编码示意图如下图 3.2 所示。

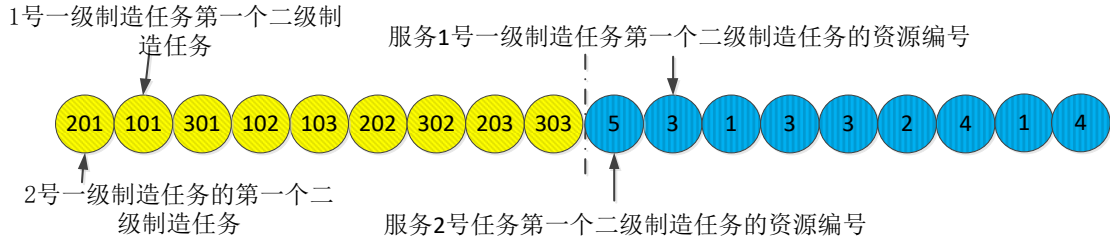


图 3.2 个体编码示意图

3.3.2 适应度函数的构造

适应度函数的构造是采用多层编码的遗传算法寻找最优解的重要一步，适应度函数值的取值反映算法是否接近最优解，遗传算法一般用来求解最大值，适应度值越大则染色体个体越优，个体所代表的调度方案越合适，根据目标函数的定义即满足总制造服务时间，总制造服务成本，资源负载均衡度均取最小值，平均制造服务质量取最大值，对于遗传算法通常采用单目标函数作为适应度函数对染色体进行评价选择，因此对于多目标优化问题可将其转化为单目标函数的形式进行求解。本文中采用线性加权的方式构造单目标函数，适应度函数表达式为：

$$fitness(x) = \frac{1}{W_1 \frac{T - T_{min}}{T_{min}} + W_2 \frac{C - C_{min}}{C_{min}} - W_3 \frac{Q - Q_{max}}{Q_{max}} + W_4 \frac{MRL - MRL_{min}}{MRL_{min}}} \quad (3-8)$$

其中 W_1, W_2, W_3, W_4 表示总制造服务时间，总制造服务成本，平均制造服务质量，资源负载均衡度的权重值； T_{min} 表示不考虑其他指标影响仅考虑总制造服务时间时，总制造服务时间的最小值； C_{min} 表示不考虑其他指标影响仅考虑总制造服务成本时，总制造服务成本的最小值； Q_{max} 表示不考虑其他指标影响仅考虑制造服务质量时，平均制造服务质量的值； MRL_{min} 表示不考虑其他指标影响仅考虑资源负载均衡度时，资源负载均衡度的最小值。

3.3.3 选择操作

选择操作采用轮盘赌法选择适应度较好的染色体，个体选择概率为：

$$Pi(i) = \frac{Fitness(i)}{\sum_{i=1}^n Fitness(i)} \quad (3-9)$$

$$Fitness(i) = \frac{1}{fitness(i)} \quad (3-10)$$

其中 $Pi(i)$ 表示染色体 i 在每次选择中被选中的概率。

3.3.4 交叉操作

遗传算法中交叉操作是对种群进行更新的重要手段,通过交叉可以为种群带来新的个体,交叉后的新个体继承父代的优良性状,具有更强的适应能力,通过交叉操作获得新染色体,从而推动整个种群向前进化,交叉操作采用整数交叉法即随机取整数点进行染色体交叉互换。交叉的基本操作如下:首先在种群中随机选取两个染色体,并取出每个染色体的前 $\sum_{i=1}^n k_i$ 位,然后随机选择交叉位置进行交叉。只对个体的前 $\sum_{i=1}^n k_i$ 位进行交叉,交叉后某些一级制造任务的二级子任务是多余的,某些一级制造任务的二级制造任务缺失,需要将一级制造任务的二级制造任务多余的操作变为一级制造任务其二级制造任务缺失的操作,并按交叉前个体的操作资源来调整个体 $(\sum_{i=1}^n k_i + 1)$ 位到 $2\sum_{i=1}^n k_i$ 位的服务资源,如下图 3.3 所示,染色体交叉位置为 6。

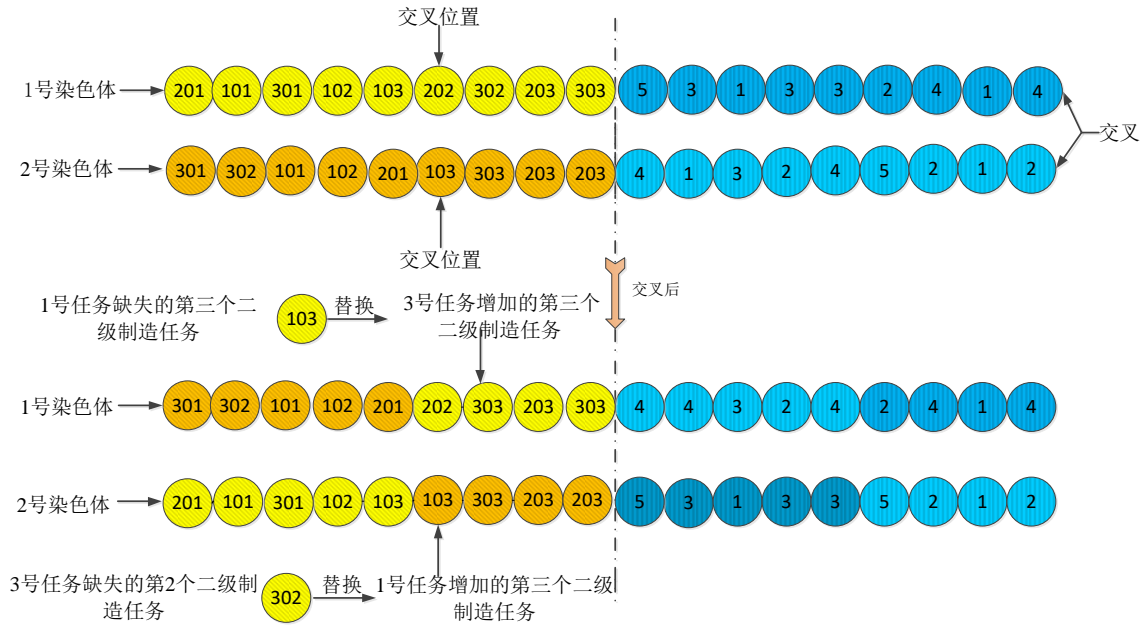


图 3.3 染色体交叉示意图

3.3.5 变异操作

变异操作是种群获取新基因的手段,有利于提高丰富种群基因的多样性。在进行变异操作时,在染色体上随机选取变异点,例如变异位置如下图 3.4 中的染色体的位置 6 和 7,通过交换位置 6 和位置 7 所代表的二级制造任务,同时交换两位置所代表的二级制造任务对应的资源编号。

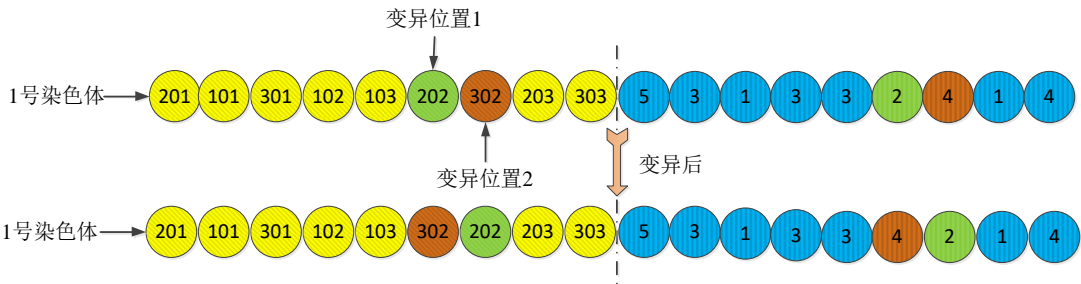


图 3.4 染色体变异操作示意图

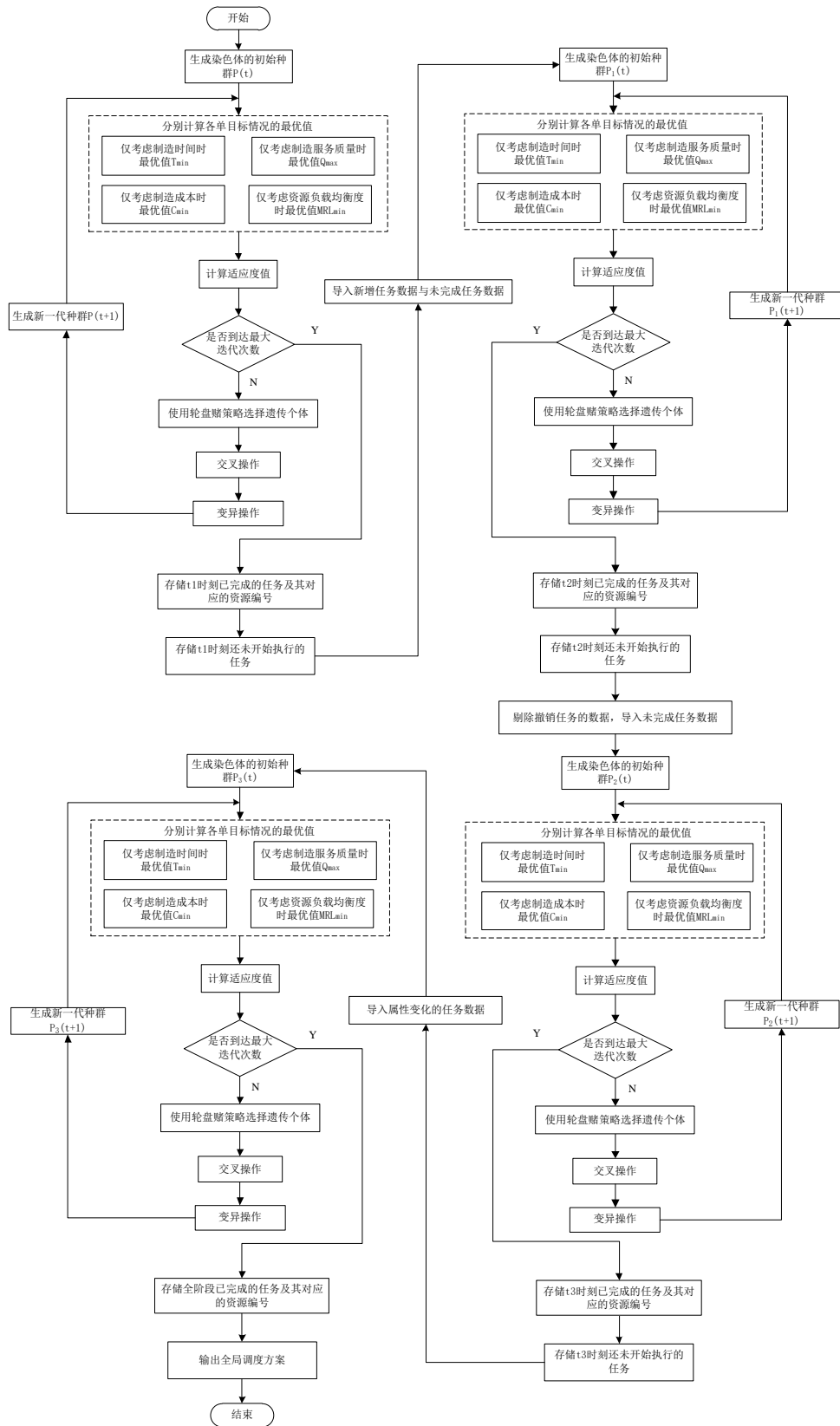


图 3.5 调度全阶段流程图

3.4 仿真实验

为了验证云制造环境下基于多层编码的遗传算法对解决本文问题的有效性,本文模拟在不同的时刻云制造服务平台中出现不同任务变化情况,云制造调度系统智能响应。初始制造任务集 $H_1 = \{F_1, F_2 \cdots F_i \cdots F_n\}$ 中包含 8 种不同类型的一级制造任务且每种一级制造任务数量为 2, 因此, 初始制造任务集 H_1 中共有 16 个一级制造任务, 一级制造任务 F_i 由 5 种二级制造任务构成, 各类型一级制造任务 F_i 的结构如图 3.6 所示, 制造任务集 H_1 的具体信息如下表 3-5 所示。

实际生产中各资源对制造任务的制造服务时间、制造服务成本、资源服务质量等参数是动态变化的, 受诸多因素的影响且不同的资源其数据的计算方式各异, 计算过程比较复杂, 本文中的资源数据参考文献[70]中资源的部分数据, 采用文献[71]中对数据的处理方式消除各指标之间的因为单位和数量级上的差别, 以便于适应度值的计算。云制造服务平台中的可供选择资源的服务加工能力信息见附录表 1 所示, 不同资源间物流时间见附录表 2, 物流成本见附录表 3, 一级制造任务 F_i 经任务分解后形成二级制造任务 F_{ij} , 二级制造任务 F_{ij} 的候选资源数据见附录表 4 所示。本文中设置三个任务变化时间点分别为 $t_1 = 20h$, $t_2 = 50h$, $t_3 = 70h$ 。在 $t_1 = 20h$ 时刻制造任务集 $G = \{F_{n+1}, F_{n+2} \cdots F_{n+r}\}$ 到达云制造服务平台, 此时制造任务集 $H_1 = \{F_1, F_2 \cdots F_i \cdots F_n\}$ 在 $t_1 = 20h$ 未开始的制造任务所构成的制造任务集 $H_{unfished}^1$ 与新增的制造任务集 G 构成制造任务集 $H_2 = \{H_{unfished}^1, G\}$, 云制造服务平台针对制造任务集 $H_2 = \{H_{unfished}^1, G\}$ 继续进行调度。制造任务集 $G = \{F_{n+1}, F_{n+2} \cdots F_{n+r}\}$ 由 8 种类型的任务构成且每种类型的任务数量为 1, 制造任务集 G 中的任务数量为 8 个, 制造任务集 G 的相关信息如下表 3-6 所示; $t_2 = 50h$ 时刻对制造任务集 $H_2 = \{H_{unfished}^1, G\}$ 中的任务 21,23 进行撤销, $t_2 = 50h$ 时制造任务集 $H_2 = \{H_{unfished}^1, G\}$ 中部分任务已经完成, 剩余未开始的制造任务构成新的制造任务集 $H_3 = \{H_{unfished}^2\}$, 云制造服务平台针对制造任务集 $H_3 = \{H_{unfished}^2\}$ 继续进行资源调度; 当 $t_2 = 70h$, 改变任务 17 的优先级, 使任务 17 优先完成, 在 $t_2 = 70h$ 时, 制造任务集 $H_3 = \{H_{unfished}^2\}$ 中部分任务已经完成, 剩余未开始的制造任务构成新的制造任务集 $H_4 = \{H_{unfished}^3\}$, 云制造服务平台针对制造任务集 $H_4 = \{H_{unfished}^3\}$ 继续进行调度, 最后完成整体调度。

表 3-5 制造任务集 H_1 的任务类型及二级制造任务类型

一级制造任务	一级制 造任务 数量	二级制造任务类型				
		第一个 二级制 造任务	第二个 二级制 造任务	第三个 二级制 造任务	第四个 二级制 造任务	第五个 二级制 造任务
Task-JLCH20181110	2	2	3	5	4	1
Task-JLCH20181111	2	1	3	4	5	2
Task-JLCH20181112	2	3	4	1	2	5
Task-JLCH20181113	2	4	2	1	5	3
Task-JLCH20181114	2	5	3	2	1	4
Task-JLCH20181115	2	1	4	2	3	5
Task-JLCH20181116	2	2	5	1	4	3
Task-JLCH20181117	2	3	2	4	5	1

本文研究的 8 种类型的制造任务结构类型如图 3.6 所示。其中 Task-JLCH-20181110 表示第一种一级制造任务的名称，数字“1, 2, 3, 4, 5”表示二级制造任务的类型，“→”表示二级制造任务的服务顺序，“2→3→5→4→1”表示第二种类型二级制造任务首先被服务，其次是第三种类型的子任务，其他类型的一级制造任务的情况以此类推。

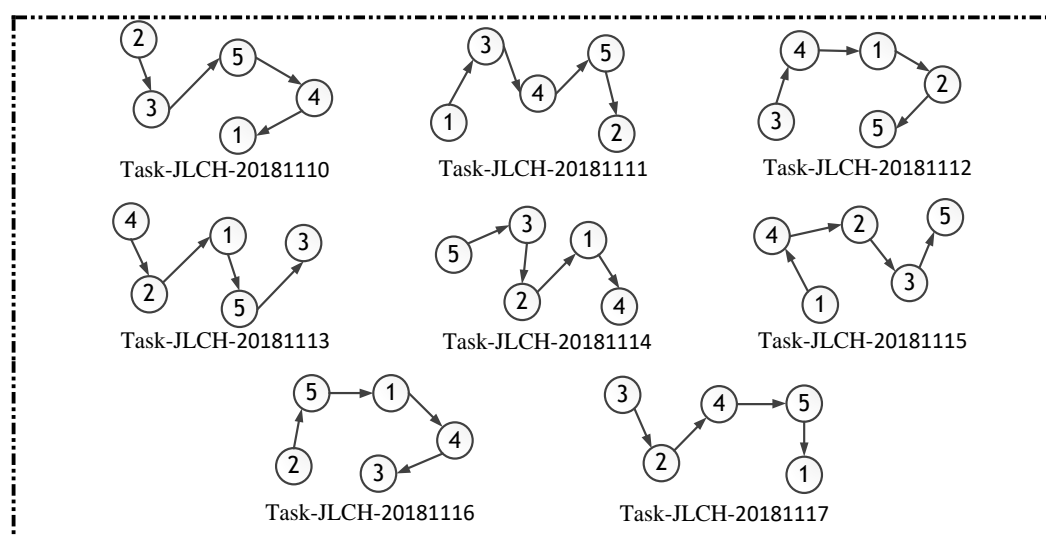


图 3.6 各类型任务结构图

表 3-6 制造任务集 G 的任务类型及二级制造任务类型

一级制造任务	一级制 造任务 数量	二级制造任务类型				
		第一个 二级制 造任务	第二个 二级制 造任务	第三个 二级制 造任务	第四个 二级制 造任务	第五个 二级制 造任务
Task-JLCH20181110	1	2	3	5	4	1
Task-JLCH20181111	1	1	3	4	5	2
Task-JLCH20181112	1	3	4	1	2	5
Task-JLCH20181113	1	4	2	1	5	3
Task-JLCH20181114	1	5	3	2	1	4
Task-JLCH20181115	1	1	4	2	3	5
Task-JLCH20181116	1	2	5	1	4	3
Task-JLCH20181117	1	3	2	4	5	1

根据本文创建的调度模型,结合多层编码的遗传算法,采用 MATLAB 编程进行运算,全过程最大遗传进化代数为 7000,0 到 20h,云制造平台中无任何干扰阶段,算法迭代次数为 2000;20h 至 50h,增加新任务阶段,算法迭代次数为 2000;50h 到 70h,任务发生撤销阶段,算法迭代次数为 2000;70h 至调度完成,任务属性变化阶段,算法迭代次数为 1000。每代保留百分之十的个体进入子代故代沟取 0.9,总制造服务时间权重为 0.4168,总制造服务成本权重为 0.2694,平均制造服务质量权重为 0.1928,资源间负载均衡度权重为 0.1210,最晚交货期 T_{max} 设置为 240,最高服务成本 C_{max} 设置为 4000,规定的最低平均服务质量 Q_{min} 为 90。

具体实施步骤如下:

- Step 1 初始化种群参数,设定初始种群数量 $N_p = 300$,代沟为 0.9,交叉概率 $P_c = 0.9$;变异概率 $P_m = 0.1$;
- Step 2 计算单独考虑总制造服务时间(T)时总制造服务时间的最小值 T_{min} ,单独考虑总制造服务成本 C 时制造服务时间的最小值 C_{min} ,单独考虑平均制造服务质量 Q 时平均服务质量的 Q_{max} ,单独考虑资源间负载均衡度(MRL)时资源间负载均衡度的最小值 MRL_{min} ,将各目标进行归一化处理得到归一化后的适应度函数,计算种群中个体的适应度函数值;
- Step 3 选择操作采用轮盘赌法从种群中选择适应度较好的染色体;
- Step 4 进行交叉变异操作,从种群中随机选取两个染色体,并取出每个染色体的前 $\sum_{i=1}^n k_i$ 位,然后随机选择交叉位置进行交叉,随机从种群中选取变异个体,

然后选择变异位置 pos1 和 pos2, 最后把个体中 pos1 和 pos2 位的待服务子任务机器对应的资源号对换;

Step 5 根据适应度值选择最优个体, 若满足收敛条件, 结束返回最优解, 否则返回 Step 2;

Step 6 对最优个体进行解码, 转换为调度结果;

Step 7 保存 Step 6 中在 $t=t_1$ 时刻还未开始的制造任务集 $H_{unfinished}^1$;

Step 8 对新加入的制造任务集 G 与 $H_{unfinished}^1$ 进行数据处理, 然后按照 Step 1, Step 2, Step 3, Step 4, Step 5, Step 6 进行操作;

Step 9 对最优个体进行解码, 转换为调度结果;

Step 10 保存 Step 9 中在 $t=t_2$ 时刻还未开始的制造任务集 $H_{unfinished}^2$, 并对制造任务 21, 23 进行撤销;

Step 11 对制造任务集 $H_{unfinished}^2$ 进行数据处理, 然后按照 Step 1, Step 2, Step 3, Step 4, Step 5, Step 6 进行操作;

Step 12 对最优个体进行解码, 转换为调度结果;

Step 13 改变制造任务集 $H_{unfinished}^3$ 中任务 17 的优先级, 对制造任务集 $H_{unfinished}^3$ 进行数据处理, 初始化种群参数, 设定初始种群数量 $N_p = 300$, 最大遗传代数为 $NG = 1000$, 代沟为 0.9, 交叉概率 $P_c = 0.9$; 变异概率 $P_m = 0.1$; 然后按照 Step 2, Step 3, Step 4, Step 5, Step 6 进行操作;

Step 14 输出全局最佳调度结果。

得到调度的甘特图与多目标函数变化曲线如下图 3.7, 3.8 调度结果如表 3-7 所示。

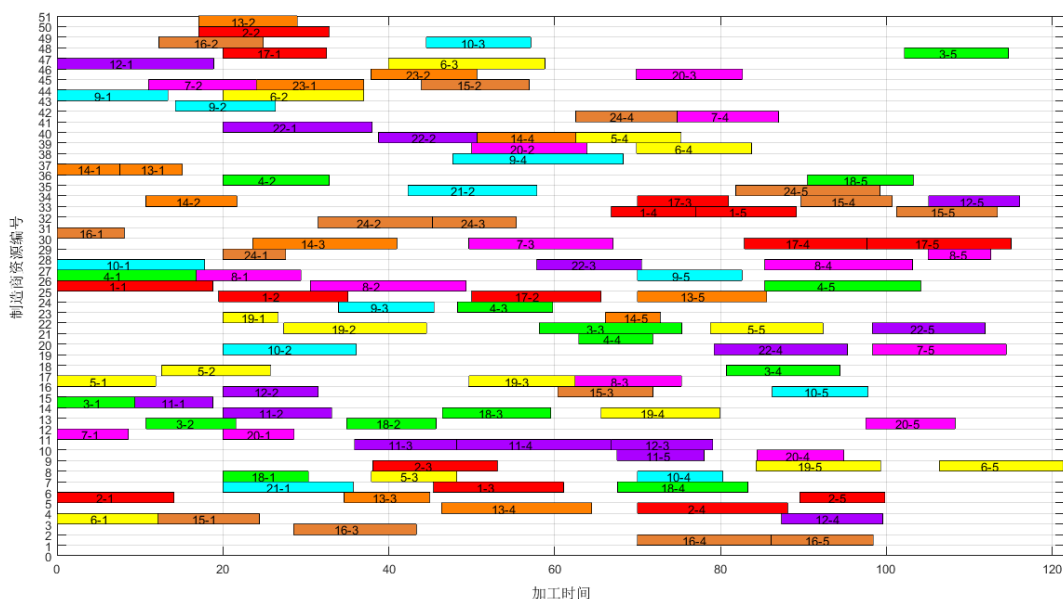


图 3.7 全阶段调度甘特图

调度全局甘特图如图 3.7 所示, 图形纵坐标表示资源编号, 横坐标表示制造任务的制造时间, 甘特图方块的长度代表二级制造任务的加工时间, 方块中的字符串代表二级制造任务的编号, 如 6-1 表示第 6 个任务的第一个二级制造任务, 5-3 代表第 5 个任务的第三个二级制造任务, 以此类推。

在时间段 0 到 20h 间, 云制造调度系统未发生扰动, 制造任务在各资源点上有序进行, 如图 3-8 中制造二级制造任务 1-1, 2-1, 3-1, 4-2, 5-1, 7-1 等已经制造完成, 子任务 3-2, 5-2, 8-1, 9-2 等二级制造任务在 $t_1=20h$ 正在执行, 按照调度规则 8, 二级制造任务一旦开始制造, 不可中断, 直至完成。

当 $t_1=20h$ 时, 制造任务集 $G = \{F_{n+1}, F_{n+2} \cdots F_{n+r}\}$ 到达云制造服务平台在 $t_1=20h$ 还未开始执行的任务与制造任务集 $G = \{F_{n+1}, F_{n+2} \cdots F_{n+r}\}$ 构成新的制造任务集合 $H_2 = \{H_{unfinished}^1, G\}$, 由云制造服务平台根据制造任务集 $H_2 = \{H_{unfinished}^1, G\}$ 继续进行调度服务。在时间段 20h 至 50h 之间, 云制造调度系统中未发生其他扰动, 制造任务在各资源点上有序进行, 如图 3.7 所示, 在 20h 至 50h 之间, 二级制造任务 2-2, 4-2, 2-2, 10-2, 11-2 等已完成, 二级制造任务 1-3, 2-3, 6-3 等在 $t_2=50h$ 还未制造完成, 同理按规则 8, 制造二级制造任务一旦开始制造, 不可中断, 直至完成; 从图 3.7 可知, 二级制造任务 17-1, 18-1, 19-1, 20-1 等制造任务集 G 中的任务开始执行。

当 $t_2=50h$ 时, 对任务 21 与 23 进行撤销, 从图 3.7 可知, 在 $t_2=50h$ 时二级制造任务 21-1, 21-2, 23-1, 23-2 均以完成, 撤销的是二级制造任务 21-3, 21-4, 21-5 与 23-3, 23-4, 23-5 这 6 个二级制造任务, 在时间段 50h 至 70h 之间, 云制造调度系统中未发生其他扰动, 除撤销的制造任务外剩余任务在各资源点上有序进行, 如图 3.7 所示, 在 50h 至 70h 之间, 二级制造任务 14-4, 17-2, 20-2 已完成, 在 $t_3=70h$ 二级制造任务 8-3, 11-5, 12-3, 15-3, 18-4 等二级制造任务正在执行, 同理按规则 8, 二级制造任务一旦开始直到执行结束。

当 $t_3=70h$ 时, 对剩余未完成的制造任务集 $H_4 = \{H_{unfinished}^3\}$ 中的制造任务 17 改变其优先级, 让其以最快时间完成, 从图 3-7 可知, 在任务 17 在 $t_3=70h$ 时其二级制造任务 17-1, 17-2 已经完成, 二级制造任务 17-3 在 $t_3=70h$ 时即开始被执行, 17-4, 17-5 在调度一开始即开始执行。70h 后云制造系统没有其他扰动, 剩余制造任务在各资源上有序进行, 直到所有任务完成。

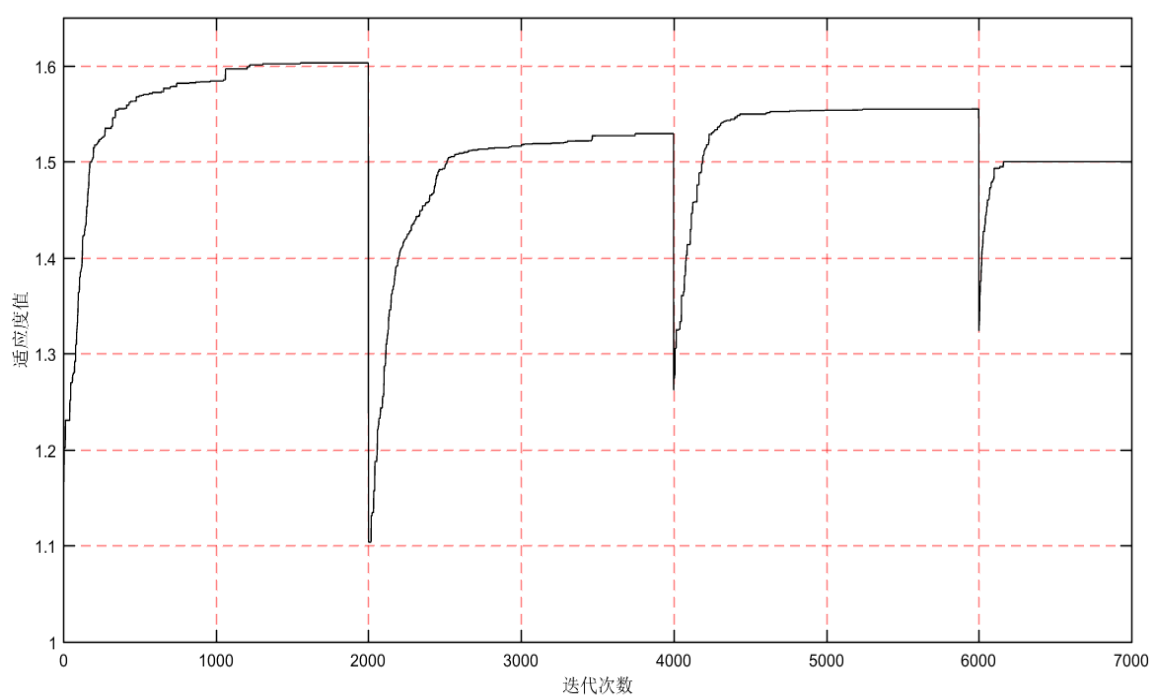


图 3.8 调度全周期适应度函数变化曲线

表 3-7 全局调度方案

任务编号	资源编号	任务编号	资源编号
1-1	25	13-1	36
1-2	24	13-2	50
1-3	6	13-3	5
1-4	32	13-4	4
1-5	46	13-5	24
2-1	5	14-1	36
2-2	49	14-2	33
2-3	8	14-3	29
2-4	17	14-4	39
2-5	19	14-5	22
3-1	14	15-1	3
3-2	12	15-2	44
3-3	21	15-3	15
3-4	41	15-4	8
3-5	35	15-5	7
4-1	26	16-1	30
4-2	35	16-2	48
4-3	23	16-3	2
4-4	20	16-4	33
4-5	25	16-5	29
5-1	16	17-1	47

5-2	17	17-2	24
5-3	7	17-3	8
5-4	39	17-4	33
5-5	40	17-5	32
6-1	3	18-1	7
6-2	43	18-2	12
6-3	46	18-3	13
6-4	38	18-4	6
6-5	20	18-5	47
7-1	11	19-1	22
7-2	44	19-2	21
7-3	29	19-3	16
7-4	9	19-4	13
7-5	12	19-5	45
8-1	26	20-1	11
8-2	25	20-2	38
8-3	16	20-3	45
8-4	27	20-4	4
8-5	34	20-5	28
9-1	43	21-1	6
9-2	42	21-2	34
9-3	23	21-3	撤销
9-4	37	21-4	撤销
9-5	21	21-5	撤销
10-1	27	22-1	40
10-2	19	22-2	39
10-3	48	22-3	27
10-4	19	22-4	24
10-5	15	22-5	21
11-1	14	23-1	44
11-2	13	23-2	45
11-3	10	23-3	撤销
11-4	10	23-4	撤销
11-5	9	23-5	撤销
12-1	46	24-1	28
12-2	15	24-2	31
12-3	10	24-3	31
12-4	3	24-4	41
12-5	4	24-5	29

3.5 本章小结

本章对云制造环境下基于制造任务变化的动态调度问题进行了模拟仿真,模拟了在云制造调度的全生命周期中出现新增制造任务,制造任务撤销,制造任务属性变化三种情况。首先,通过层次分析法确定各优化目标的权重;然后,考虑不同的时间点发生不同的干扰事件并采用基于多层编码的遗传算法进行了仿真实验;最后,模拟调度系统智能处理干扰事件,并得到了相应的全局调度方案。

第4章 基于资源变化的动态调度建模

通过上文对云制造环境下基于制造任务变化的资源动态调度的研究,本章主要针对云制造环境下制造资源发生变化时的动态调度进行研究。云制造环境下资源的动态性主要体现在资源属性变化、新资源接入、资源撤出及资源维护。

4.1 云制造资源

云制造资源是云制造模式下资源调度的基础,在云制造环境下资源从其定义的角度可分为广义资源和狭义资源。全程参与制造加工过程的设备资源称为狭义的制造资源,广义制造资源则指的是产品从最初的设计到产品完成全生命周期中所有涉及的各种资源的总和。从资源粒度的角度云制造资源可分为单一功能的资源和复合功能的资源,单一功能的资源其具备的能力单一高效,复合功能资源其同时具备多类能力,其综合服务能力强。本文基于复合资源进行云制造环境下基于资源变化的动态调度研究。

(1) 云制造资源的服务组合

云制造环境下制造资源的种类繁多,功能属性各异,云制造系统通过资源分类技术实现云制造资源按资源功能或资源粒度的分类,类型不同的资源其功能各异,同一类型的资源其服务同一个制造任务的功能亦不相同。在云制造服务平台中是制造任务往往是由多个子任务构成,不同的子任务对资源的需求各异,此时,云制造服务平台通过资源匹配技术实现不同类型的资源进行服务组合共同完成制造任务。

(2) 云制造资源的动态性分析

云制造资源动态性主要从以下两个角度进行分析:

1) 从云制造系统的角度,云制造系统的组成结构复杂,参与者众多,其内部一直处于复杂的动态变化中,因此,云制造系统其本身就是一个不断变化的动态系统。云制造系统的动态属性是研究云制造环境下基于资源变化的动态调度的理论基础。

2) 从制造资源自身的角度,云资源以数据形式存储于云平台,其状态属性随着其服务进程实时发生变化或繁忙或空闲或维修等,同时云资源动态的接入和撤出云制造系统亦是云制造资源动态的重要表现形式。

4.2 基于资源变化的动态调度问题描述

云制造环境下资源以数据形式存在于云制造服务平台中,云制造环境下资源具有分布性,多样性,抽象性,动态性等特点,云制造服务平台中初始任务集合 $U_1 = \{F_1, F_2 \cdots F_i \cdots F_n\}$ 由 n 个任务构成,任务 F_i 可分解为成包含 k_i 种不同二级制造任务的集

合即 $F_i = \{F_{i1}, F_{i1} \cdots F_{ij} \cdots F_{ik_i}\}$, 每个二级制造任务 F_{ij} 有多个候选制造资源, 二级制造任务可随机在候选资源上进行执行。初始资源集 $E^1 = \{E_1, E_2 \cdots E_i \cdots E_l\}$, 由于资源属性区别, 同类型的资源服务相同的任务其可靠度及服务效率, 服务时间, 成本均会有差异。不同的资源可能属于不同的企业, 故资源与资源之间的物理距离会导致二级制造任务在执行过程中产生相应的物流时间和物流成本。云制造环境下资源调度的动态调度将制造过程看成动态过程, 云制造环境下资源调度的全周期中会多种不同的扰动因素, 本章主要针对云制造环境下基于资源变化的动态调度进行研究, 资源的动态性主要体现在如下方面:

(1) 资源属性变化

云制造资源以网络数据的形式存储于云制造平台, 不同类型的资源对应不同的加工任务, 资源的状态实时更新, 云制造服务加工过程中, 云制造资源在服务完成后用户对该云制造资源的服务进行综合评价, 资源综合评价好, 资源的服务属性会变强, 反之则变弱。在初始时刻 t_0 制造任务集 $U_1 = \{F_1, F_2 \cdots F_i \cdots F_n\}$ 中各类任务在不同资源节点上进行有序的服务, 在云制造服务制造周期的 t_1 时刻, 云制造平台中 $E_1, E_2 \cdots E_i$ 等资源的综合服务能力发生变化, 属性变化后的资源用 $E_1^*, E_2^* \cdots E_i^*$ 表示, 则资源集由初始资源集 E^1 更新为 E^2 , $E^2 = \{E_1^*, E_2^* \cdots E_i^* \cdots E_l\}$, 在 t_1 时刻制造任务集 $U_1 = \{F_1, F_2 \cdots F_i \cdots F_n\}$ 中还未开始的制造任务形成新的制造任务集 $U_2 = \{U_{unfinished}^1\}$, 云制造服务平台针对制造任务集 $U_2 = \{U_{unfinished}^1\}$ 根据资源属性更新后的资源集 $E^2 = \{E_1^*, E_2^* \cdots E_i^* \cdots E_l\}$ 生成新的服务于制造任务集 U_2 的调度方案。

(2) 新资源接入

云制造资源具有分布性、多样性、抽象性、动态性和异构性等特点, 在资源调度全生命周期的 t_2 时刻, 云制造服务平台中接入 $E_{l+1}, E_{l+2} \cdots E_{l+c}$ 等新资源, 在 t_2 时刻还未完成的制造任务形成新的制造任务集 $U_3 = \{U_{unfinished}^2\}$, 云制造服务平台按新接入的资源 $E_{l+1}, E_{l+2}, E_{l+c}$ 与资源集 $E^2 = \{E_1^*, E_2^* \cdots E_i^* \cdots E_l\}$ 构成新的资源集 $E^3 = \{E_1^*, E_2^* \cdots E_i^* \cdots E_l, E_{l+1}, E_{l+2}, E_{l+c}\}$ 并服务于制造任务集 $U_3 = \{U_{unfinished}^2\}$, 继续进行调度服务。

(3) 资源维护

云制造服务加工过程中, 第三阶段制造任务集 $U_3 = \{U_{unfinished}^2\}$ 中各类任务在云制造服务平台的安排下在资源集 $E^3 = \{E_1^*, E_2^* \cdots E_i^* \cdots E_l, E_{l+1}, E_{l+2}, E_{l+c}\}$ 上有序的服务, 在云制造服务制造周期的 t_3 时刻, 云制造平台中 $E_b, E_{b+1} \cdots E_{b+q}$ 等资源发生故障进行维修撤出此次云制造服务, 云制造平台中资源集合由 E^3 更新为 E^4 , 不同的资源其维修时间长短不一样, 因此, 其后续重新接入云平台的时间也不相同。对 $U_3 =$

$\{U_{unfinished}^2\}$ 中在 t_3 时刻未完成的任务构成新的制造任务集合 $U_4 = \{U_{unfinished}^3\}$ ，云制造服务平台根据更新后的资源 E^4 对任务集合 U_4 继续进行调度服务。

(4) 资源撤销

云制造服务加工过程中，第四阶段任务集 U_4 中各类任务在云制造服务平台的统一调配下在不同资源节点上进行有序的服务，制造任务的执行进程到 t_4 时刻，云制造平台中 E_p, E_{p+1}, E_{p+w} 等资源发生故障撤出此次云制造服务，云制造服务平台中的资源集合由 E^4 更新为 E^5 ，撤销的资源后续不在参与调度服务，将第四阶段任务集 U_4 在 t_4 时刻未完成的任务构成新的制造任务集合 $U_5 = \{U_{unfinished}^4\}$ ，云制造服务平台根据更新后的资源 E^5 对任务集合 U_5 在继续进行调度服务。

为了便于分析本文作如下相关调度规则：

Rule 1: 每个制造资源能独立完成一项或几项二级制造任务，同一项二级制造任务在同一时刻不可被不同制造资源加工；

Rule 2: 一级制造任务分解后形成二级制造任务，二级制造任务为最小待服务单元；

Rule 3: 二级制造任务 F_{ij} 与下一个二级制造任务 $F_{i(j+1)}$ 在不同制造资源之间加工制造会产生一定的物流成本，物流时间；

Rule 4: 任务的服务方式是按二级制造任务前后次序有序接受服务，后一项二级制造任务的开始时间不小于前一项二级制造任务结束时间与两个二级制造任务所选资源之间的物流时间之和；

Rule 5: 不同资源之间的物流成本与物流时间与物流距离成正比；

Rule 6: 不同类型的一级制造任务执行优先级相同；

Rule 7: 在零时刻所有云制造资源均可用；

Rule 8: 二级制造任务 F_{ij} 一旦开始加工后直至其制造服务完成，期间不可中断。

4.3 基于资源变化的动态调度数学模型

4.3.1 数学符号及其描述

本文以制造任务总制造服务时间(T)，总制造服务成本(C)，制造资源效率(E)，制造资源可靠度(Rel)为优化目标。 x_{ijp} 为决策变量，如下式所示：

$$x_{ijp} = \begin{cases} 1 & \text{表示资源} p \text{ 服务于二级制造任务 } F_{ij} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (4-1)$$

表 4-1 模型相关物理量定义

物理量	代表意义
T	总制造服务时间
C	总制造服务成本
E	制造资源平均服务效率
Rel	制造资源平均可靠度
T_{max}	用户规定最晚交货期
C_{max}	用户规定最高服务成本
E_{min}	用户规定最低平均服务效率
Rel_{min}	用户规定最低资源平均可靠度
n	任务总数
F_i	一级制造任务 i
F_{ij}	一级制造任务 i 的第 j 个二级制造任务
k_i	第 i 个一级制造任务的二级制造任务数
x_{ijp}	决策量（资源 p 是否处于加工状态）
t_{ijp}	二级制造任务 F_{ij} 在资源 p 上的服务加工时间
t'_{ijp}	二级制造任务 F_{ij} 在资源 p 上的物流时间
c_{ijp}	二级制造任务 F_{ij} 在资源 p 上的服务加工成本
c''_{ijp}	二级制造任务 F_{ij} 在资源 p 上运输成本
m_{ij}	二级制造任务 F_{ij} 的候选资源数

4.3.2 优化目标

(1) 总制造服务时间目标函数

总制造服务时间是指从制造服务开始到最后一个二级制造任务完成，总制造服务时间的目标函数表达式如下：

$$T = \text{Max}\{T_{ij_end} | i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k_i\} \quad (4-2)$$

T_{ij_end} 表示一级制造任务 F_i 的最后一个二级制造任务 F_{ij} 的完成时间。

(2) 总制造服务成本目标函数

制造服务成本因包括制造二级制造任务 F_{ij} 的制造加工成本，二级制造任务 F_{ij} 与下一个二级制造任务 $F_{i(j+1)}$ 在不同服务资源之间的物流成本。在云制造环境下资源调度中云制造服务平台给用户提供的制造资源应满足总制造服务成本最少。总制造服务成本其目标函数表达式如下：

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{p=1}^{m_{ij}} x_{ijp} (c_{ijp} + c'_{ijp}) \quad (4-3)$$

c_{ijp} 是表示二级制造任务 F_{ij} 在资源 p 上的加工成本, c'_{ijp} 表示二级制造任务 F_{ij} 与 $F_{i(j+1)}$ 之间的物流成本。

(3) 制造资源平均可靠度目标函数

云制造环境下资源的可靠度是资源的自身属性, 是用户对资源在服务质量可靠和服务时间可靠的综合评价, 资源的可靠度随着资源的不断参与制造服务, 用户不断对资源的可靠度进行评价动态更新。参考文献[72]中对资源可靠度的定义给出本文关于制造资源可靠度目标函数表达式如下:

$$Rel_{ijp} = \varphi_1 Rel_{ijp}^q + \varphi_2 Rel_{ijp}^t \quad (4-4)$$

$$Rel = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{p=1}^{m_{ij}} x_{ijp} Rel_{ijp}}{nk_i} \quad (4-5)$$

可靠度 Rel_{ijp} 表示资源 p 在规定时间内以一定的服务质量完成二级制造任务 F_{ij} 的能力, Rel_{ijp}^q 表达资源 p 服务二级制造任务 F_{ij} 时服务质量可靠度, Rel_{ijp}^t 表示资源 p 服务二级制造任务 F_{ij} 时服务时间可靠度, 其中 $\varphi_1 = \varphi_2 = 0.5$ 。

(4) 制造资源平均服务效率目标函数

云制造环境下资源的提供方的综合实力, 设备服务能力, 计算能力, 制造能力, 分析能力等因素有关都会对资源的服务效率产生影响, 不同的资源服务于相同的任务其服务效率亦会不同, 平均制造资源服务效率目标函数表达式如下:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{p=1}^{m_{ij}} x_{ijp} E_{ijp}}{nk_i} \quad (4-6)$$

其中 E_{ijp} 表示资源 p 在服务二级制造任务 F_{ij} 时的效率。

综上所述, 云制造环境基于资源变化的动态调度多目标函数表达如下:

$$\begin{aligned} F(x) &= (f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x)) \\ &= (Min T, Min C, Max E, Max Rel) \end{aligned} \quad (4-7)$$

$f_1(x)$ 表示总制造服务时间目标函数, $f_2(x)$ 总制造服务成本目标函数, $f_3(x)$ 表示制造资源平均可靠度目标函数, $f_4(x)$ 表示制造资源平均服务效率目标函数。

4.3.3 约束条件

(1) 总制造服务时间约束:

每个任务的执行时间不可超过用户规定的最大完成时间即:

$$T = \text{Max}(T_{ij_end}) \leq T_{max} \quad (i = 1, 2 \dots n) \quad (4-8)$$

T 表示制造任务总的制造时间, T_{max} 表示用户规定最晚交货期。

(2) 总制造服务成本约束:

总制造服务成本不能超过用户预算即:

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{p=1}^{m_{ij}} x_{ijp} (c_{ijp} + c'_{ijp}) \leq C_{max} \quad (4-9)$$

C_{max} 表示用户的预算成本

(3) 资源平均可靠度约束:

$$Rel = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{p=1}^{m_{ij}} x_{ijp} Rel_{ijp}}{nk_i} \geq Rel_{min} \quad (4-10)$$

(4) 制造资源平均服务效率约束:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{p=1}^{m_{ij}} x_{ijp} E_{ijp}}{nk_i} \geq E_{min} \quad (4-11)$$

(5) 二级制造任务加工时序约束:

任务的服务方式是按二级制造任务顺序接受服务, 后置项二级制造任务的服务开始时间不小于前置二级制造任务的任务结束时间与物流时间之和即有:

$$\text{Max}(t_{end_{ij}} + t'_{end_{ij}}) \leq t_{start_{i(j+1)}} \quad (4-12)$$

$t_{end_{ij}}$ 表示二级制造任务 F_{ij} 的完成时间, $t'_{end_{ij}}$ 表示二级制造任务 F_{ij} 与二级制造任务 $F_{i(j+1)}$ 所在资源之间的物流时间, $t_{start_{i(j+1)}}$ 表示二级制造任务 $F_{i(j+1)}$ 的任务开始时间。

(6) 子任务的粒度约束:

任务分解后形成的二级制造任务为加工最小单元粒度, 每个制造资源能独立完成一种或几种类型二级制造任务, 同一个二级制造任务在同一时刻不可被不同制造资源加工, 即有:

$$\sum_{p=1}^{m_{ij}} x_{ijp} = 1 \quad (4-13)$$

4.4 本章小结

本章对云制造环境下制造资源的动态性进行了分析, 对云制造环境下制造资源四类动态情况即资源属性变化, 新资源接入及资源维修及若干资源撤销进行了介绍, 对基于制造资源变化的资源动态调度进行了问题描述, 并给出了相关约束的概念即总制造时间约束, 总制造服务成本约束, 资源可靠度约束, 资源服务效率约束, 子任务时

序约束，最后以总制造服务时间，总制造服务成本，资源平均可靠度与制造资源平均服务效率为优化目标构建了多目标优化调度数学模型。

第5章 基于资源变化的动态调度仿真

云制造服务中资源需求方对资源提供方服务完成后进行综合评价,有些资源因综合评价高,其服务属性越来越强,反之一些资源随着用户评价低其服务属性会越来越差,在进行下一次云制造服务时较差的云制造资源会被云制造服务平台筛选掉。同时在云制造调度的全生命周期中,云制造资源状态实时更新,云制造资源会产生较多突发状况,如云制造资源撤销退出云制造服务,云制造资源维修不能参与云制造服务,新资源的接入等。为此需要综合考虑云制造环境下资源的各种突发状况,合理安排资源对云制造任务进行服务。提高云制造系统对资源突发状况的反应能力,提高云制造系统的调度柔性,更加贴近实际生产,为实际生产提供一定的理论指导。

5.1 粒子群优化算法

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是计算智能领域,除了蚁群算法,鱼群算法之外的一种群体智能的优化算法。PSO 算法是从这种生物群行为特征中得到启发并用于求解优化问题的,算法中每个粒子都代表问题的一个潜在解,每个粒子对应一个由适应度函数决定的适应度值。粒子的速度决定了粒子移动的方向和距离,速度随自身及其他粒子的移动经验进行动态调整,从而实现个体在可行解空间中寻优。

5.1.1 粒子群算法基本原理

PSO 算法首先在可行解的范围内初始化一群粒子,每个粒子都代表极值优化问题的一个潜在最优解,用位置,速度和适应度值三项指标表示该粒子特征,适应度值由适应度函数计算得到,其值的好坏表示粒子的优劣。粒子在解空间中运动,通过跟踪个体极值 P_{best} 和群体极值 G_{best} 更新个体位置。个体极值 P_{best} 是指个体粒子搜索到的适应度值最优位置,群体极值 G_{best} 是指种群中所有粒子搜索到的最优位置,粒子每更新一次位置,就计算一次适应度值,并且通过比较新粒子的适应度值和个体极值、群体极值的适应度更新个体极值 P_{best} 和群体极值 G_{best} 位置。

假设在一个 D 维的搜索空间中,由 q 个粒子组成的种群 $X = (X_1, X_2, \dots, X_q)$, 其中第 l 个粒子表示为一个 D 维的向量 $X_l = (x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{lD})^T$ 。根据目标函数即可计算出每个粒子位置 X_l 对应的适应度值。第 l 个粒子的速度 $V_l = (V_{l1}, V_{l2}, \dots, V_{lD})^T$, 其个体极值为 $P_l = (P_{l1}, P_{l2}, \dots, P_{lD})^T$, 种群的群体极值为 $P_g = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gD})^T$ 。在每次迭代过程中粒子通过个体极值和群体极值更新自身的速度和位置,即

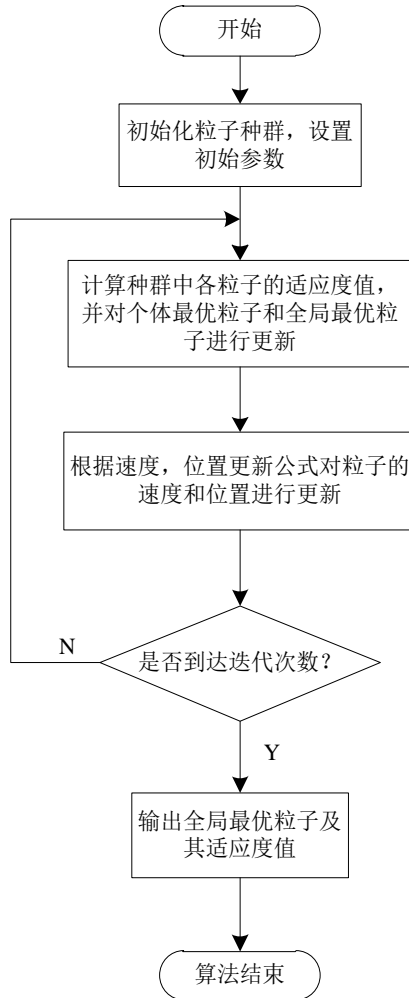
$$V_{ld}^{f+1} = \omega V_{ld}^f + c_1 r_1 (P_{ld}^f - X_{ld}^f) + c_2 r_2 (P_{gd}^f - X_{ld}^f) \quad (5-1)$$

$$X_{ld}^{f+1} = X_{ld}^f + V_{ld}^{f+1} \quad (5-2)$$

其中 ω 表示惯性权重； $d=1, 2, \dots, D$ ； $l=1, 2, \dots, q$ ； f 为当前迭代次数； V_{ld} 表示粒子速度， c_1, c_2 为非负常数，称为加速因子； r_1, r_2 是分布于 $[0,1]$ 区间的随机数。为防止粒子的盲目搜索，一般将粒子的位置和速度限制在一定的区间 $[-X_{max}, X_{max}]$ 、 $[-V_{max}, V_{max}]$ 。

5.1.2 粒子群算法流程及步骤

根据粒子群算法基本原理可以得到算法基本流程如下图 5.1 所示。



5.1 粒子群算法基本流程图

算法的主要步骤如下：

- Step 1 对算法中各类参数的设置，对粒子的初始位置和初始速度进行随机初始化；
- Step 2 计算每个粒子的适应度值；
- Step 3 对于不同的粒子其在搜索过程中会经过一个最好的位置，将当前位置的适应度值与其在最好位置的适应度值进行比较，若当前位置粒子的适应度值优于历史最好位置粒子的适应度值，则将当前位置粒子的适应度值作为个体历史最优适应度值，同时用粒子当前位置更新粒子历史最优位置；
- Step 4 然后，通过比较个体粒子的历史最佳适应度值与粒子群体在其最优位置处的适应度值的大小，若粒子群体在其最优位置初的适应度值大于个体粒子的最佳适应度值，则将粒子群体在其最优位置初的适应度值作为当前全局最优的适应度值，位置作为当前粒子的最优位置；
- Step 5 根据速度，位置更新公式对粒子的速度和位置进行更新操作；
- Step 6 计算位置，速度更新后粒子的适应度值，若未达到终止条件，则继续步骤 Step 2 操作。

5.2 基于改进粒子群算法的资源动态调度

为了实现云制造环境下基于云制造资源动态变化情况下的资源调度问题，首先分析资源的各类变化情况，然后根据云制造环境下资源调度问题是 NP 问题的特点，对待服务的任务和资源进行编码构成初始调度方案解空间，通过粒子群算法实现对该调度问题的求解。本节中我们将详细介绍如何运用粒子群算法实现对该问题的求解，编码方式采用实数编码与整数编码相结合，适应度函数通过第四章模型可知并且采用线性加权的模式，各指标权重值的计算方式采用层次分析法求解，最后在 MATLAB 2016a 环境下采用粒子群算法实现对该动态调度问题的求解。

5.2.1 编码

编码的目的是将实际问题解转化为计算机可识别任务的方式，结合本文调度问题的特点，一级制造任务 F_i 可分解为 k_i 个二级制造任务 F_{ij} ，每个二级制造任务 F_{ij} 可由多个制造资源执行，因此，本文对粒子的编码方式采用实数编码和整数编码。例如，有 n 个一级制造任务，每个一级制造任务 F_i 可分解为 k_i 个二级制造任务 F_{ij} ，本文中对粒子编码共分为三层，粒子的第一层表示二级制造任务层，通过取 1 到 n 之间的整数对其赋值，第一层可表示为 [1 1 1 1 1 2 2 2 2 2]，即表示编号为 1 的一级制造任务由 5 个二级制造任务构成，第二层表示二级任务执行顺序层，初始通过赋 [0,1] 之间的随机实数完成，可表示为 [0.3 0.4 0.5 0.2 0.6 0.7 0.42 0.53 0.62 0.27]，任

任务的执行顺序按第二层编码随机数的大小，按数字从小到大升序排列进行有序制造；第三层表示每个二级制造任务对应分配的加工资源编号层，可表示为[1 3 5 2 4 3 1 2 4 3]；最后粒子的编码可表示为：

$$X_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2; \\ 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.2 & 0.6 & 0.7 & 0.42 & 0.53 & 0.62 & 0.27; \\ 1 & 3 & 5 & 2 & 4 & 3 & 1 & 2 & 4 & 3; \end{bmatrix}$$

5.2.2 适应度函数构造

适应度函数是算法寻优的标尺，粒子适应度函数的值反应了调度方案的优劣，适应度函数的值越大反应了粒子越接近最优调度方案，云制造环境下资源调度问题其本质是 NP-hard 问题，只能对问题进行优化，接近最优解。本文中根据待优化的目标对云制造环境下资源调度问题进行多目标优化，选择在相关约束条件下的最佳的调度方案。根据第四章的 4.2 节，本文中采用线性加权的方式构造单目标函数，构造取适应度值函数表达式为：

$$fitness(x) = \frac{1}{W_1 \frac{T - T_{min}}{T_{min}} + W_2 \frac{C - C_{min}}{C_{min}} - W_3 \frac{E - E_{max}}{E_{max}} - W_4 \frac{Rel - Rel_{max}}{Rel_{max}}} \quad (5-3)$$

其中 W_1, W_2, W_3, W_4 表示总制造服务时间，总制造服务成本，制造资源平均服务效率，制造资源平均可靠度的权重值； T_{min} 表示单独考虑制造服务时间时制造服务时间的最小值， C_{min} 表示单独考虑制造服务成本时的最小服务成本， E_{max} 表示单独考虑平均制造服务效率时的最高制造服务效率， Rel_{max} 表示单独考虑平均资源可靠度时平均资源可靠度的最大值，由本文 3.1 节，层次分析法确定 W_1, W_2, W_3, W_4 的值，本文中假定总制造服务时间与总制造服务成本同等重要，总制造服务时间较平均制造服务效率稍微重要，较资源平均可靠度稍微重要，制造服务平均效率较资源平均服务效率同等重要，按 1-9 标度构造初始判断矩阵及归一化后的矩阵 \bar{B} 分别如下表 5-1, 5-2 所示：

表 5-1 目标层初始判断矩阵

	T	C	Rel	E
T	1	1	2	2
C	1	1	2	2
Rel	1/2	1/2	1	1
E	1/2	1/2	1	1

表 5-2 归一化后的标准矩阵 \bar{B}

	T	C	Rel	E
T	0.333	0.333	0.333	0.333
C	0.333	0.333	0.333	0.333
Rel	0.167	0.167	0.167	0.167
E	0.167	0.167	0.167	0.167

然后根据上文权重计算步骤，首先对归一化后的矩阵 \bar{B} 按行元素相加，并做归一化处理，得到权向量 $W=[0.333,0.333,0.167,0.167]^T$ 并通过公式（3-5）计算得 $\lambda_{max}=4$ ，由公式（3-6），（3-7）进行一致性检验，由 $CI=0<0.1$ ，判断矩阵具有完全一致性且满足一致性检验，故本文所求权重合理。本文权重为 $W=[0.333,0.333,0.167,0.167]^T$ 。

5.2.3 粒子位置与速度更新

粒子速度与位置更新操作是粒子群算法的核心步骤之一，是粒子进行更新生成新一代粒子的操作，通过记录粒子个体最优值与种群最优值完成粒子的速度位置更新，同时完成任务执行顺序层和资源层的更新，通过任务执行顺序层和资源层的更新对应生成新的任务执行顺序并计算新的任务执行顺序所对应的适应度函数值。适应度值是判断粒子在哪个位置时其对应的调度方案较优的判断准则，在本文中适应度值越大则代表粒子所代表的调度方案越优，粒子的速度与位置更新按以下公式进行计算，其中 ω 表示惯性权重。

$$V_{ld}^{f+1} = \omega V_{ld}^f + c_1 r_1 (P_{ld}^f - X_{ld}^f) + c_2 r_2 (P_{gd}^f - X_{ld}^f) \quad (5-4)$$

$$X_{ld}^{f+1} = X_{ld}^f + V_{ld}^{f+1} \quad (5-5)$$

5.2.4 粒子群算法的改进

粒子群算法中粒子依靠速度位置的更新来更新种群，较大的惯性权重值让粒子每次进行更新时具有较大速度，能让粒子最大范围遍历搜索解空间，但粒子速度过大，在下一次粒子更新后，粒子速度过大可能会穿过最优解的位置，而当惯性权重过小时，粒子每次速度更新的差异比较小，容易让粒子陷入局部搜索空间，因此，在本文中的惯性权重采用线性权重的形式，即惯性权重 ω 按公式（5-6）线性变化。

$$\omega = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{Max - ITER} \times f \quad (5-6)$$

5.3 仿真分析

本文模拟云制造服务平台对待执行制造任务集 U 中各类任务进行执行, 制造任务集 U 由 8 种不同类型的一级制造任务构成且每种类型的一级制造任务数量为 5, 每个一级制造任务由 5 个二级制造任务构成, 故一级制造任务总数为 40, 二级制造任务总数为 200。交货截止期 T_{max} 设置为 240, 最高服务成本 C_{max} 设置为 7500, 最低服务效率 E_{min} 设置为 0.60, 最低平均资源可靠度 Rel_{min} 设置为 90。制造任务集 U 相关信息见表 5-3; 在云制造服务平台中, 初始 50 组可供选择的资源信息见附录表 5, 各资源可靠度数据见附录表 6, 相关资源属性变化后的数据见附录表 7, 新增资源相关数据见附录表 8。设置 $t_1=30h$, 资源 5 号, 12 号, 20 号, 27 号制造资源属性发生改变; $t_2=70h$ 时, 51 号, 52 号, 53 号, 54 号, 55 号资源新接入云制造服务平台; $t_3=90h$ 时, 8 号, 15 号, 23 号, 35 号资源进行维修其维修时间分别为 20h, 30h, 45h, 50h; $t_4=110h$ 时, 7 号, 19 号, 26 号, 37 号, 44 号资源撤出云制造服务平台。

表 5-3 制造任务集 U 的任务类型及二级制造任务类型

一级制造任务	任务数量	二级制造任务类型				
		第一个二级制造任务	第二个二级制造任务	第三个二级制造任务	第四个二级制造任务	第五个二级制造任务
Task-JLCH20181110	5	2	3	5	4	1
Task-JLCH20181111	5	1	3	4	5	2
Task-JLCH20181112	5	3	4	1	2	5
Task-JLCH20181113	5	4	2	1	5	3
Task-JLCH20181114	5	5	3	2	1	4
Task-JLCH20181115	5	1	4	2	3	5
Task-JLCH20181116	5	2	5	1	4	3
Task-JLCH20181117	5	3	2	4	5	1

根据本文创建的调度模型, 结合改进粒子群算法, 采用 MATLAB 2016a 编程进行运算, 全阶段迭代次数为 2500 次, 部分资源属性变化阶段迭代 500 次, 新资源接入阶段迭代 500 次, 部分资源维修阶段迭代 500 次, 部分资源撤销阶段迭代 500 次。具体实施流程如下:

Step 1 初始化参数设置如下: 种群个体数目为 200, 粒子最大速度 $V_{max}=2$, 最小速度 $V_{min}=-2$, 加速因子 $c_1=2$, $c_2=2$, 最大惯性权重 $w_{max}=0.9$, $w_{min}=0.4$ 。

- Step 2 计算单独考虑总制造服务时间(T)时, 总制造服务时间的最小值 T_{min} ; 计算单独考虑总制造服务成本(C)时, 总制造服务成本的最小值 C_{min} ; 计算单独考虑资源平均可靠度(Rel)时, 资源平均可靠度的最大值 Rel_{max} ; 计算单独考虑资源平均效率(E)时, 资源平均效率的最小值 E_{max} , 将各目标进行归一化处理得到归一化后的适应度函数, 计算种群中个体的适应度函数值;
- Step 3 对于不同的粒子其在搜索过程中会经过一个最好的位置, 将当前位置的适应度值与其在最好位置的适应度值进行比较, 若当前位置粒子的适应度值优于历史最好位置粒子的适应度值, 则将当前位置粒子的适应度值作为个体历史最优适应度值, 同时用粒子当前位置更新粒子历史最优位置;
- Step 4 然后, 通过比较个体粒子的历史最佳适应度值与粒子群体在其最优位置处的适应度值的大小, 若粒子群体在其全局最优位置处的适应度值大于个体粒子的最优适应度值, 则将粒子群体在其全局最优位置处的适应度值作为当前全局最优的适应度值, 位置作为当前粒子的最优位置;
- Step 5 根据速度, 位置更新公式对粒子的速度和位置进行更新操作;
- Step 6 计算位置, 速度更新后粒子的适应度值, 若未满足终止条件, 则继续步骤 Step 2 操作;
- Step 7 对最优个体进行解码, 转换为调度结果;
- Step 8 保存 Step 7 中在 $t=t_1$ 时刻还未开始的制造任务集 $U_{unfinished}^1$, 更新 $t=t_1$ 时资源数据;
- Step 9 对制造任务集 $U_{unfinished}^1$ 进行数据处理, 继续 Step 1, Step 2, Step 3, Step 4, Step 5, Step 6;
- Step10 对最优个体进行解码, 转换为调度结果;
- Step11 保存 Step 10 中在 $t=t_2$ 时刻还未开始的制造任务集 $U_{unfinished}^2$, 更新 $t=t_2$ 时资源数据;
- Step12 对制造任务集 $U_{unfinished}^2$ 进行数据处理, 继续 Step 1, Step 2, Step 3, Step 4, Step 5, Step 6;
- Step13 对最优个体进行解码, 转换为调度结果;
- Step14 保存 Step 13 中在 $t=t_3$ 时刻还未开始的制造任务集 $U_{unfinished}^3$, 更新 $t=t_3$ 时资源数据;
- Step15 对制造任务集 $U_{unfinished}^3$ 进行数据处理, 继续 Step 1, Step 2, Step 3, Step 4, Step 5, Step 6;
- Step16 对最优个体进行解码, 转换为调度结果;

Step17 保存 Step 16 中在 $t=t_4$ 时刻还未开始的制造任务集 $U_{unfinished}^4$ ，更新 $t=t_4$ 时资源数据；

Step18 对制造任务集 $U_{unfinished}^4$ 进行数据处理，继续 Step 1，Step 2，Step 3，Step 4，Step 5，Step 6；

Step19 对最优个体进行解码，转换为调度结果；

Step20 输出全阶段调度方案；

得到调度的甘特图与多目标函数变化曲线如下图 5.3, 5.4 所示，调度结果如表 5-4 所示。

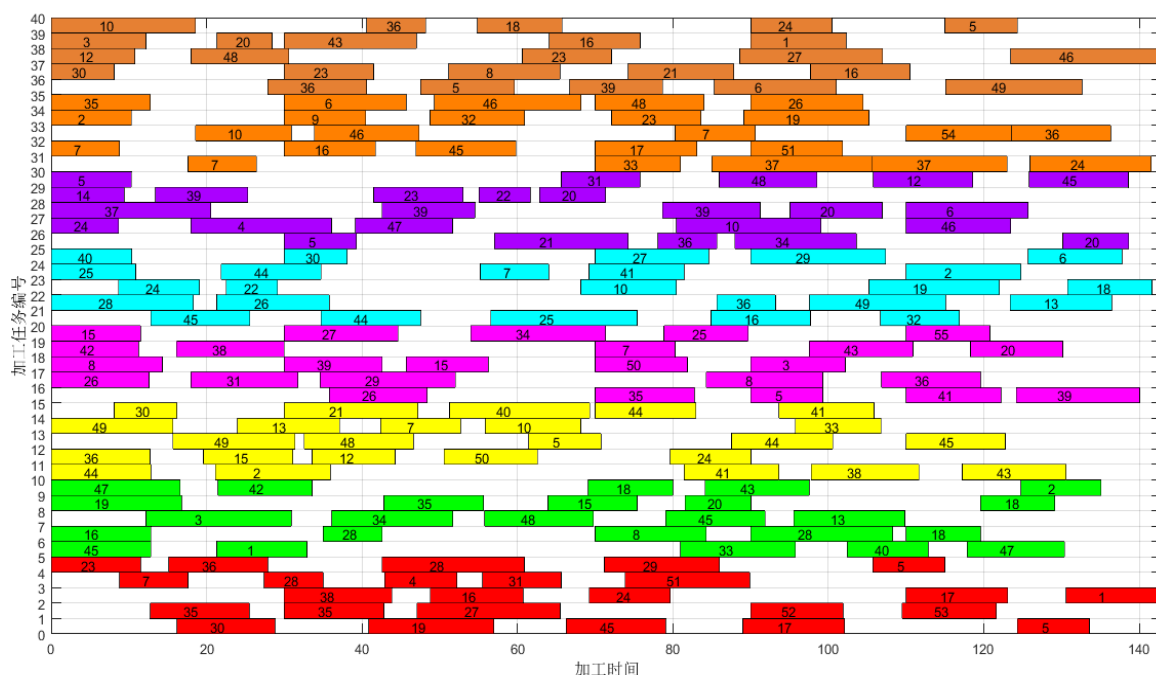


图 5.3 调度全过程甘特图

调度全局甘特图如图 5.3 所示，图形纵坐标表示一级制造任务编号，从图可以看出，每个一级制造任务都由 5 个二级制造任务构成，横坐标表示制造时间，甘特图中每个方块代表了一个二级制造任务，方块的长度表示方块所代表的二级制造任务被服务的时间，方块中的数字代表服务这个二级制造任务的资源。如 25 号一级制造任务，其方块中的数字依次为 40→30→27→29→6 其代表的含义为，25 号任务的第一个二级制造任务在 40 号资源上加工，第二个二级制造任务在 30 号资源上加工，为了表述方便，后面的表达式中用 25-1 表示任务 25 的第一个二级制造任务，以此类推。

在时间段 0 到 30h 间，云制造调度系统未发生扰动，制造任务在各资源点上有序进行制造，如图 5.3 中制造二级制造任务 1-1，2-1，4-1，4-2，5-1，5-2 等已经制造完成，二级制造任务 4-2，6-2，8-1 等制造子任务 $t_1=30h$ 还未制造完成，按照调度规

则 8，二级制造任务一旦开始制造，不可中断，直至完成。

当 $t_1=30h$ 时，资源池中 5 号，12 号，20 号，27 号制造资源属性发生改变，在 $t_1=30h$ 还未开始执行的任务需在云制造系统的统一调度下在新的资源池中完成调度服务，在时间段 30h 至 70h 之间，云制造调度系统中未发生其他扰动，制造任务在各资源点上有序进行制造，如图 5.3 所示，在 30h 至 70h 之间制造二级制造任务 1-2，2-2，2-3，3-1，3-2，等子任务已完成，二级制造任务 1-3，3-3，7-3 等在 $t_2=70h$ 还未制造完成，同理按规则 8，二级制造任务一旦开始制造，不可中断，直至完成；从图 5.3 可知，5 号，12 号，20 号，27 号制造资源属性发生改变后，在 30h 至 70h 之间，5 号资源服务于二级制造任务 13-3，26-1，36-2；12 号资源服务于二级制造任务 12-3，20 号资源服务于二级制造任务 29-4，27 号资源服务于二级制造任务 2-3，20-2。

$t_2=70h$ 时，51 号，52 号，53 号，54 号，55 号资源新接入云制造服务平台，在 $t_1=70h$ 还未开始执行的任务需在云制造系统的统一调度下在新的资源池中完成调度服务，在时间段 70h 至 90h 之间，云制造调度系统中未发生其他扰动，制造任务在各资源点上有序进行制造，如图 5.3 所示，在 70h 至 90h 之间制造二级制造任务 9-4，12-4，20-4 等子任务已完成，二级制造任务 1-4，6-3，8-4 等在 $t_2=90h$ 还未制造完成，同理按规则 8，二级制造任务一旦开始制造，不可中断，直至完成；从图 5.3 可知，在新接入的 51 号资源在 70h 至 90h 时间段服务于二级制造任务 4-5。

$t_3=90h$ 时，8 号，15 号，23 号，35 号资源进行维修其维修时间分别为 20h，30h，45h，50h，资源经过维修后可再次参与云制造服务，因此资源 8 号在 20h 后可参与云制造服务，资源 15 号在 30h 后可参与云制造服务，其他资源情况，以此类推。在 $t_3=90h$ 还未开始执行的任务需在云制造系统的统一调度下在新的资源池中完成调度服务，在时间段 90h 至 110h 之间，云制造调度系统中未发生其他扰动，制造任务在各资源点上有序进行制造，如图 5.3 所示，在 90h 至 110h 之间二级制造任务 16-3，18-5，32-3 等已完成，二级制造任务 5-5，6-4，30-5 等在 $t_2=110h$ 还未制造完成，同理按规则 8，二级制造任务一旦开始制造，不可中断，直至完成；从图 5.3 可以看出，维修的资源，8 号，15 号，23 号，35 号在时间段 90h 至 110h 没参与云制造资源调度服务。

$t_4=110h$ 时，7 号，19 号，26 号，37 号，44 号资源撤出云制造服务平台不参与往后的云制造服务，云制造服务平台根据撤销 7 号，19 号，26 号，37 号，44 号资源后新形成的资源集合对在 $t_4=110h$ 还未开始的任务进行资源调度，从图 5.3 可知，在 $t_4=110h$ 直到调度结束 7 号，19 号，26 号，37 号，44 号都不参与调度服务。

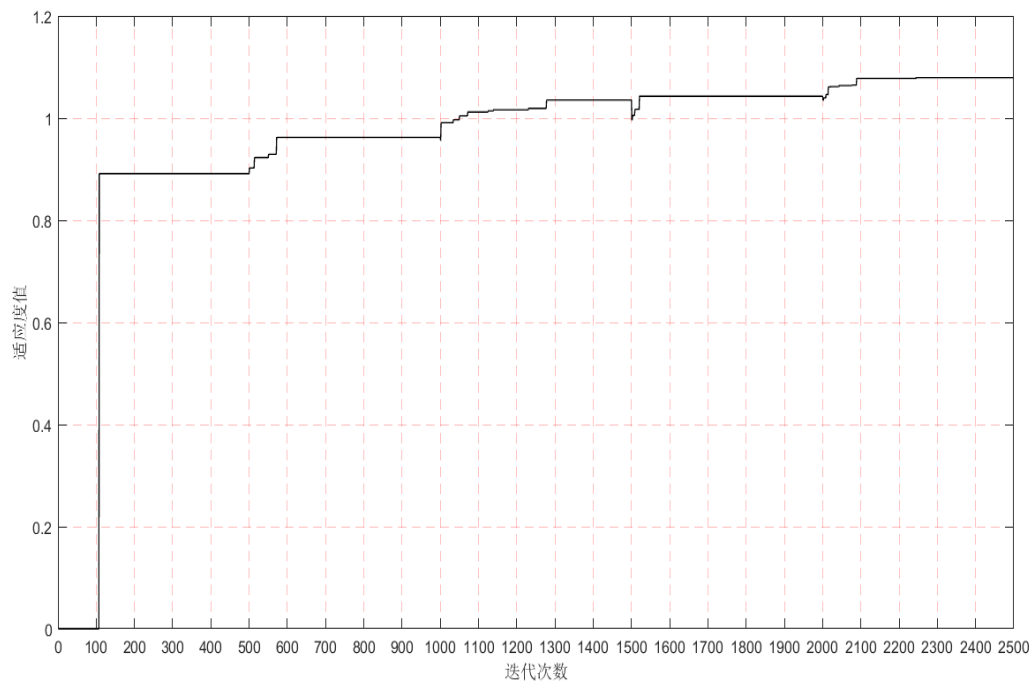


图 5.4 调度全阶段适应度曲线

表 5-4 全局调度方案

任务编号	资源编号	任务编号	资源编号
1-1	27	21-1	6
1-2	19	21-2	22
1-3	20	21-3	20
1-4	4	21-4	53
1-5	24	21-5	32
2-1	7	22-1	24
2-2	42	22-2	24
2-3	43	22-3	31
2-4	11	22-4	29
2-5	3	22-5	43
3-1	7	23-1	38
3-2	24	23-2	36
3-3	28	23-3	20
3-4	29	23-4	45
3-5	29	23-5	42
4-1	23	24-1	24
4-2	26	24-2	16
4-3	9	24-3	47
4-4	11	24-4	45
4-5	15	24-5	32

5-1	48	25-1	28
5-2	42	25-2	44
5-3	28	25-3	48
5-4	31	25-4	46
5-5	29	25-5	21
6-1	47	26-1	45
6-2	8	26-2	18
6-3	17	26-3	39
6-4	17	26-4	44
6-5	31	26-5	33
7-1	34	27-1	5
7-2	35	27-2	33
7-3	21	27-3	18
7-4	46	27-4	49
7-5	30	27-5	20
8-1	34	28-1	41
8-2	30	28-2	37
8-3	21	28-3	10
8-4	6	28-4	39
8-5	36	28-5	16
9-1	12	29-1	46
9-2	49	29-2	21
9-3	15	29-3	50
9-4	40	29-4	19
9-5	48	29-5	46
10-1	16	30-1	1
10-2	30	30-2	21
10-3	33	30-3	10
10-4	24	30-4	39
10-5	31	30-5	33
11-1	28	31-1	35
11-2	29	31-2	45
11-3	49	31-3	32
11-4	48	31-4	43
11-5	33	31-5	1
12-1	12	32-1	7
12-2	6	32-2	9
12-3	26	32-3	46
12-4	27	32-4	13
12-5	17	32-5	12

13-1	12	33-1	7
13-2	13	33-2	20
13-3	5	33-3	32
13-4	36	33-4	54
13-5	46	33-5	8
14-1	44	34-1	35
14-2	11	34-2	45
14-3	47	34-3	32
14-4	10	34-4	29
14-5	9	34-5	36
15-1	44	35-1	13
15-2	6	35-2	9
15-3	5	35-3	19
15-4	54	35-4	17
15-5	33	35-5	12
16-1	26	36-1	24
16-2	2	36-2	10
16-3	49	36-3	26
16-4	40	36-4	1
16-5	30	36-5	51
17-1	15	37-1	10
17-2	17	37-2	36
17-3	34	37-3	11
17-4	25	37-4	20
17-5	55	37-5	34
18-1	32	38-1	8
18-2	23	38-2	47
18-3	37	38-3	26
18-4	28	38-4	25
18-5	22	38-5	1
19-1	33	39-1	36
19-2	36	39-2	35
19-3	37	39-3	31
19-4	50	39-4	40
19-5	55	39-5	16
20-1	37	40-1	39
20-2	48	40-2	20
20-3	7	40-3	54
20-4	55	40-4	41
20-5	22	40-5	24

5.4 本章小结

本章对云制造环境下基于制造资源变化的动态调度问题进行了模拟仿真,模拟了在云制造调度的全生命周期中出现新增制造资源,制造资源撤销,制造资源属性变化,制造资源维修四类情况,通过采用改进的粒子群算法进行了仿真实验,设置不同的时间点发生不同的干扰事件,调度系统智能处理干扰事件,并得到相对应的全局调度方案。

第6章 结论和展望

6.1 结论

云制造模式是将制造生产方式向服务化,绿色化,个性化转变的制造新模式,本文研究内容以云制造理论为背景,以异地分布的云制造资源协同,共享,高效的完成云制造任务为目标并结合国家自然科学基金项目(项目编号:51405030):云制造环境下可制造性评价理论与方法研究,对云制造环境下资源动态调度展开研究。

首先,通过对云制造环境下资源调度的全生命周期进行研究,在调度的过程中极易发生各类扰动事件,云制造环境下资源调度是云制造理论的核心部分,是云制造理论与实践结合的桥梁。调度的过程既是云制造服务平台作为“大脑”思考并实践的过程。调度方案即是云制造服务平台根据服务需求方的任务需求智能化的选择资源并给出不同任务的服务开始时间与服务结束时间。云制造服务平台的“大脑”功能还体现在应对环境中的复杂干扰因素时能够自行思考后给出合理调度策略。本文分析了云制造环境下资源调度过程中的各类干扰事件,提出了应对新任务加入,任务属性变化,任务撤销等干扰事件的调度策略,并结合调度问题中的主要影响因素如总制造服务时间,总制造服务成本,平均服务满意度及资源间负载均衡度等因素建立多目标优化模型,采用基于多层编码的遗传算法对该问题进行求解,仿真实验结果表明该应对策略能有效的提高了云制造服务平台的柔性。在有效完成任务的前提下保证最低的服务成本,最小的服务完成时间以及最小的资源负载均衡度。

然后以云制造资源为研究目标,对云制造环境下云制造资源在调度过程中会发生诸如资源损坏,维修,资源属性变化,资源撤销等问题进行了分析并给出了云制造服务调度系统在云制造资源出现扰动事件后的调度策略,保证云制造任务顺利完成。并结合调度问题中的主要影响因素如制造服务时间,制造服务成本,资源可靠度及资源执行服务效率等因素建立多目标优化模型,采用改进粒子群优化算法对该问题进行求解,仿真实验结果表明该应对策略能有效的提高了云制造服务平台的柔性。在有效完成任务的前提下保证最低的服务成本,最小的服务完成时间以及最高的资源可靠度及最优的资源整体服务效率。本文当前的研究成果为如何实现云制造环境下资源调度过程中有效应对针对资源突发干扰事件起到相应的指导作用。

最后为了进一步验证模型的有效性,分别对两个问题进行仿真实验,验证了所建立的模型的有效性和所得的调度方案的可行性,为进一步研究在云制造环境下动态调度提供了有效的参考。

6.2 展望

未来的工作包括:

1)深入研究云制造环境下资源调度的特征,进一步研究影响资源调度的因素如任务的延迟,初始状态的任务具有不同的优先级,任务的个性需求等并建立不同资源调度模型,对各影响因素的权重计算采用根据贴合用户实际要求的方式进行求解;

2)对任务结构进行分析,充分考虑不同的任务结构如子任务间的并联,考虑资源的不同服务组合方式,结合实际问题采用不同算法对资源调度问题进行求解,分析其他驱动云制造服务平台动态调度的因素,同时实现云制造环境下资源的实时调度也是未来需要开展的研究工作。

致 谢

毕业论文的书写已经接近尾声，起身侧立于窗前，此时的校园静谧，有微风拂面而来，我仰望夜空，星星眨巴着眼睛，似乎知道我要诉说什么，等待倾听。是的，此时我的内心正在独白，只是又有一丝酸楚，不禁叹岁月荏苒，时光飞逝，三年的读研究生涯即将接近尾声。再回首，往事依旧。我在长春工业大学南湖校区所经历的每一分每一秒似乎都历历在目，清晰可见，天下没有不散的筵席，此刻我唯有感激，感谢你们出现在我的生命里，让我今生拥有，倍加珍惜。

首先，我要对我的导师胡艳娟副教授说一声谢谢，能成为您的学生是我今生的荣耀。忘不了第一次师生相见，您温暖的笑容化解了我内心的紧张与不安；忘不了与您一起品读文章，您独特的教育视角，让我懂得做研究要独辟蹊径，不要随波逐流；忘不了您悉心指导我的论文，您的启发与引导使我的思路豁然开朗；难以忘记的太多太多，每一点每一滴都早已在我心中生根发芽。今后的道路上，它们将陪伴我努力前行，实现自己的梦想，让您为我感到骄傲。

然后，我要感谢我的室友于文函，徐亚辉，张学文，阳建峰，张宇，季春天，王艺霖，我们一起朝夕相处的三年时光，将谱写进我致青春中最美丽的篇章；我要感谢我的同窗好友们，谢谢你们在学习上对我的帮助和生活中的点滴关心；我要感谢我的实验室的师弟、师妹们，与你们共度的每一分每一秒我都很快乐，叫我一声师兄，我却没能给予你们更多的帮助，深感愧疚，希望在以后的道路上，我们能够互相帮助，共同前行。

最后，我要感谢我的家人，没有你们，就没有今天我所取得的成绩。感谢爸妈为儿子倾注的半生心血，是你们的操劳换来今天我所拥有的一切，你们对儿子深沉的爱，用世间任何词语描述都略显苍白；感谢我的亲人们，你们对我的照顾与包容让我体会到血浓于水的亲情。

夜色已深，感谢的言语道不完也说不尽。下一刻我将要离去，唯有向我的老师、同学送上我最真挚的祝福，愿你们在以后的日子里一切安好。

参考文献

- [1] F.Tao,C.Li,T.Liao,Y.Laili,BGM-BLA:a new algorithm for dynamic migration of virtual machines in cloud computing,IEEE Trans.Serv.Comput.(2015).
- [2] Tao F, Zhang L, Lu K, et al. Research on manufacturing grid resource service optimal-selection and composition framework[J]. Enterprise Information Systems, 2012, 6(2):237-264.
- [3] Laili Y, Tao F, Zhang L, et al. A study of optimal allocation of computing resources in cloud manufacturing systems[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(5):671-690.
- [4] 李伯虎, 张霖.云制造[M].北京: 清华大学出版社,2015:1-10.
- [5] Alkhanak, E.N. , Lee, S.P. , Khan, S.U.R. , 2015. Cost-aware challenges for workflow scheduling approaches in cloud computing environments: Taxonomy and opportunities. Future Gen. Comput. Syst 50, 3–21 .
- [6] Malawski, M. , et al. Algorithms for cost- and deadline-constrained provision- ing for scientific workflow ensembles in IaaS clouds. Future Gen. Comput. Syst, 2015, 48, 1–18 .
- [7] Beimborn D, Miletzki T, Wenzel D W I S. Platform as a Service (PaaS)[J]. Business & Information Systems Engineering, 2011, 3(6):381-384.
- [8] Jafari Navimipour, N. et al. , 2014. Job scheduling in the Expert Cloud based on genetic algorithms. Kybernetes 43 (8), 1262–1275 .
- [9] 李伯虎, 张霖, 王时龙, 等. 云制造 一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.
- [10] 康玲, 吴华, 王时龙, 等. 面向服务的云制造系统架构分析[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(11):66-73.
- [11] 姚锡凡, 练肇通, 李永湘, 等. 面向云制造服务架构及集成开发环境[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(10):2312-2322.
- [12] 姚锡凡, 金鸿, 李彬, 等. 事件驱动的面向云制造服务架构及其开源实现[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(3):654-661.
- [13] 崔立真, 刘士军. 云制造 PaaS 平台中协同过程构建与定制方法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(10):2331-2339.
- [14] 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.

- [15]李成海, 黄必清. 基于属性描述匹配的云制造服务资源搜索方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(6):1499-1507.
- [16]盛步云, 张成雷, 卢其兵, 等. 云制造服务平台供需智能匹配的研究与实现[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(3):822-830.
- [17]李颖新, 敬石开, 李向前, 等. 云制造环境下基于用户行为感知的个性化知识服务技术[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(3):848-858.
- [18]程臻, 战德臣, 徐汉川. 云制造环境下基于本体的资源虚拟化方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(s2):106-112.
- [19]马成, 孙宏波, 肖田元, 等. 一种模型驱动的云制造联邦接入技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7):1536-1546.
- [20]王正成, 黄洋. 面向服务链构建的云制造资源集成共享技术研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(11):1324-1331.
- [21]甘佳, 段桂江. 云制造服务信任评估技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7):1527-1535.
- [22]林廷宇, 李伯虎, 柴旭东, 等. 面向云制造的模型自动组合技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7):1379-1386.
- [23]李向前, 杨海成, 敬石开, 等. 面向集团企业云制造的知识服务建模[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(8):1869-1880.
- [24]吴晓晓, 石胜友, 侯俊杰, 等. 航天云制造服务应用模式研究[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7):1595-1603.
- [25]林廷宇, 杨晨, 谷牧, 等. 面向航天复杂产品的云制造应用技术[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(第4期):884-898.
- [26]宋庭新, 张成雷, 李成海, 等. 中小企业云制造服务平台的研究与开发[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(05):1147-1154.
- [27]刘日良, 李鹏, 张承瑞, 等. 面向云制造的数控加工服务关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7):1613-1619.
- [28]王学文. 煤矿装备云制造资源服务平台研究与应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10):1888-1893.
- [29]顾新建, 黄沈权, 陈茂熙, 等. 模具行业需求驱动的云制造服务平台[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7):1650-1657.
- [30]尹翰坤, 尹超, 龚小容, 等. 汽摩零部件新产品开发云制造平台总体框架及关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(09):2332-2339.

- [31] 闫洪波, 于青, 李强, 等. 面向非标准件的云制造服务平台的研发[J]. 机械设计与制造, 2014(2):262-264.
- [32] 许湘敏. 云制造理念下基于本体及其环境感知的作业车间调度问题研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [33] Jackson J. R. Scheduling a production line to minimize maximum tardiness[J]. Management Sciences Research Project, 1955: 43-47.
- [34] Tang Jianchao, Zhang Guoji, Lin Binbin, et al. A Hybrid Algorithm for Flexible Job-Shop Scheduling Problem[J]. Procedia Engineering, 2011, 15(1):3678-3683.
- [35] Li X, Lu J, Chai G, et al. Hybrid genetic algorithm for mixed-model hybrid-shop scheduling problem[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(8):935-940.
- [36] Chen K, Zheng W M. Cloud Computing: System Instances and Current Research: Cloud Computing: System Instances and Current Research[J]. Journal of Software, 2010, 20(5):1337-1348.
- [37] Fu Jingzhi. A practical resource-searching method for manufacturing grid[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(1):335-340.
- [38] Kessentini M, Ouni A, Langer P, et al. Search-based metamodel matching with structural and syntactic measures[J]. Journal of Systems & Software, 2014, 97:1-14.
- [39] Wang Jihua, Liu Hong, Wang Huayu. A mapping-based tree similarity algorithm and its application to ontology alignment[J]. Knowledge-Based Systems, 2014, 56(C):97-107.
- [40] Tai Lijun, Hu Rufu, Chen Caowei, et al. Manufacturing Resources and Demand Intelligent Matching in Cloud Manufacturing Environment[J]. Advanced Materials Research, 2012, 616-618:2101-2104.
- [41] Trokanas N, Cecelja F, Raafat T. Semantic input/output matching for waste processing in industrial symbiosis[J]. Computers & Chemical Engineering, 2014, 66(10):259-268.
- [42] Tekli J, Chbeir R. Minimizing user effort in XML grammar matching[J]. Information Sciences, 2012, 210(10):1-40.
- [43] Lartigau J, Nie L, Xu X, et al. Scheduling Methodology for Production Services in Cloud Manufacturing[C]// International Joint Conference on Service Sciences. IEEE Computer Society, 2012:34-39.
- [44] Bahman Keshanchi, Alireza Souril, Nima Jafari Navimipour. An improved genetic algorithm for task scheduling in the cloud environments using the priority queues:

- Formal verification, simulation, and statistical testing The Journal of Systems and Software 124 (2017) 1–21
- [45] Shen Y, Bao Z, Qin X, et al. Adaptive task scheduling strategy in cloud: when energy consumption meets performance guarantee[J]. World Wide Web-internet & Web Information Systems, 2017, 20(2):1-19.
- [46] Lartigau J, Xu X, Zhan D. Artificial Bee Colony Optimized Scheduling Framework Based on Resource Service Availability in Cloud Manufacturing[J]. 2014:181-186.
- [47] Wang J, Gong B, Liu H, et al. Multidisciplinary approaches to artificial swarm intelligence for heterogeneous computing and cloud scheduling[J]. Applied Intelligence, 2015, 43(3):662-675.
- [48] Kaur P, Mehta S. Resource provisioning and work flow scheduling in clouds using augmented Shuffled Frog Leaping Algorithm[M]. Academic Press, Inc. 2017.
- [49] 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(1-4):235-251.
- [50] Wu S Y, Ping Z, Fang L. Multi-Task Scheduling Based on Particle Swarm Optimization in Cloud Manufacturing Systems[J]. Journal of South China University of Technology, 2015, 43(1):105-110.
- [51] WANG Lei, GUO Shunsheng, LI Xixing, et al. Distributed manufacturing resource selection strategy in cloud manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016:1-14.
- [52] ZHOU Jiajun, YAO Xifan. A hybrid artificial bee colony algorithm for optimal selection of QoS-based cloud manufacturing service composition[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016:1-17.
- [53] ZHENNG Hao, FENG Yixiong, TAN Jianrong. A fuzzy QoS-aware resource service selection considering design preference in cloud manufacturing system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(1):371-379.
- [54] LIU Yongkui ,XU Xun, Zhang Lin, et al. Workload-based multi-task scheduling in cloud manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 45 (2017) :3-20.
- [55] 李京生, 王爱民, 唐承统, 等. 基于动态资源能力服务的分布式协同调度技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7):1563-1574.

- [56] 邵丽君, 胡如夫, 赵韩, 等. 面向云制造服务的制造资源多目标动态优化调度[J]. 中国机械工程, 2013, 24(12):1616-1622.
- [57] 唐海波, 黄琼琼, 张明, 等. 云制造环境下资源动态调度系统研究[J]. 机械工程与自动化, 2014(6):4-6.
- [58] Jian, C.F., & Wang, Y. Batch task scheduling-oriented optimization modelling and simulation in cloud manufacturing. International [J]. Journal of Simulation Modelling, 2014, 13(1), 93-101.
- [59] Zhou L, Zhang L. A Dynamic Task Scheduling Method Based on Simulation in Cloud Manufacturing[C]. Asian Simulation Conference SCS Autumn Simulation Multi-Conference. Springer Singapore, 2016.
- [60] Zhou G, Jiang P, Huang G Q. A game-theory approach for job scheduling in networked manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41(9-10):972-985.
- [61] 刘淑丹, 蒋义伟, 周天和. 云制造环境下资源受限的同类机调度问题[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2018, 39(2):206-210.
- [62] Lartigau J, Xu X, Zhan D. Artificial bee colony optimized scheduling framework based on resource service availability in Cloud Manufacturing[C]. In: Proceedings of the 2014 International Conference on Service Sciences. Hong Kong: IEEE, 2014. 181-186.
- [63] Cheng Z, Zhan D, Zhao X, et al. Multi-task oriented virtual resource integration and optimal scheduling in cloud manufacturing[J]. Journal of Applied Mathematics, 2014, 2014:1-9.
- [64] Li W, Zhu C, Yang L T, et al. Subtask Scheduling for Distributed Robots in Cloud Manufacturing[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(2):941-950.
- [65] 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(9-12):1549-1563.
- [66] 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, DOI:10.1115/1.4034186.
- [67] 刘国宝, 张洁. 基于改进滚动时域优化策略的动态调度方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(14):182-190.

- [68] 马文龙, 朱李楠, 王万良. 云制造环境下基于 QoS 感知的云服务选择模型[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(5):1246-1254.
- [69] 郑锦, 王宇. 基于层次分析法的水面舰艇作战效能评估[J]. 自动化与仪表, 2017, (6):23-27.
- [70] 周龙飞, 张霖. 基于仿真的云制造服务动态调度关键技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2018.
- [71] 孙卫红, 吴海元, 吕文新, 等. 云制造资源的工序级多目标调度方法研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(6).
- [72] 宋文艳. 云制造资源优化配置研究[D]. 重庆大学, 2013.

附 录

表 1 可供选择的资源服务加工能力信息

资源 编号	二级 制造 任务	二级制造任务类型 1			二级制造任务类型 2			二级制造任务类型 3			二级制造任务类型 4			二级制造任务类型 5		
		加工 时间	加工 成本	服务 质量	加工 时间	加工 成本	服务 质量	加工 时间	加工 成本	服务 质量	加工 时间	加工 成本	服务 质量	加工 时间	加工 成本	服务 质量
E1		12.3	28.3	114				11.6	15.9	99				16.1	18.1	101
E2					10.3	28.2	118				14.8	28.4	112			
E3		18.7	29.9	113				12.2	19.6	123						
E4											18.1	20.4	82	9.3	28.7	101
E5		10.3	19.6	117	14.1	21.5	113									
E6											12.1	61.8	10	15.7	15.0	93
E7		10.3	18.0	108	8.8	24.8	83									
E8								20.4	15.1	119	14.3	29.3	79	15.0	16.7	108
E9														10.5	22.7	98
E10					12.3	18.3	112	18.6	18.1	108						
E11											8.6	25.2	99			
E12		10.7	22.2	113				10.8	19.1	102						
E13					14.3	20.1	87				13.1	19.4	99			
E14		9.4	21.2	102												
E15		10.6	15.7	100							11.5	18.1	84			
E16		12.8	13.3	91				11.9	25.2	97				11.7	17.4	91
E17					18.6	20.7	115				13.1	25.1	87	13.7	19.1	96
E18					9.6	20.7	105				10.9	20.6	110			
E19		16.8	16.9	95				16.1	17.5	121						
E20					7.1	36.0	86	12.9	18.6	112				8.9	30.0	118
E21											17.2	9.8	98	13.6	18.5	97
E22								6.6	27.1	121						
E23					11.5	17.8	94				11.5	22.1	107			
E24		8.7	28.0	111				15.6	13.6	107				10.4	24.5	114
E25					18.8	12.2	96							10.9	18.6	102
E26		16.8	19.5	85				14.5	16.8	102	12.6	20.2	104			
E27					12.6	26.0	90							17.8	15.7	90
E28								7.6	23.2	110				18.3	27.8	83
E29		17.4	11.9	80							14.8	17.7	84			
E30					12.6	34.4	90	8.1	33.2	122						
E31					13.8	25.0	97				10.1	33.3	114			

附 录

E32	12.2	16.3	112							10.1	26.8	97			
E33										14.8	24.0	96	10.90	15.2	90.3
E34	17.4	21.5	101				15.6	21.6	111						
E35				12.8	34.1	100	12.8	12.9	88						
E36				7.6	19.7	100	12.7	23.2	128						
E37	20.6	13.5	91							17.4	24.9	102			
E38				13.9	29.9	116							21.9	33.4	113
E39				12.6	18.1	105	15.9	29.6	107	11.9	15.1	90			
E40	18.0	28.8	110										10.4	27.7	114
E41	12.2	18.7	98										12.2	20.7	108
E42							12.1	16.3	102	11.2	24.5	110			
E43										17.0	23.9	112	13.4	25.5	102
E44				13.0	19.6	96	12.8	12.9	88						
E45	12.8	20.8	106										12.8	16.6	103
E46	18.9	19.7	113				19.9	30.7	98				13.5	22.9	102
E47	16.6	35.2	102	12.5	25.8	118									
E48				12.6	22.5	118				14.0	24.2	102			
E49	17.6	20.6	103				15.7	16.5	99						
E50				12.0	20.3	106							11.9	18.4	112

表 2 不同资源间的物流时间(1 至 16 列)

企业 编号	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16
E1	0.0	1.1	2.7	4.0	5.2	6.5	7.5	8.5	8.0	10.6	7.0	7.5	6.0	4.5	6.5	7.0
E2	1.1	0.0	1.7	3.0	4.4	5.7	6.7	7.8	9.1	9.8	6.3	5.9	6.4	9.3	11.2	11.7
E3	2.7	1.7	0.0	1.3	2.7	4.0	5.1	6.2	7.6	8.3	8.8	9.5	10.1	10.0	10.1	10.7
E4	4.0	3.0	1.3	0.0	1.5	2.7	3.9	5.0	6.3	7.1	7.6	8.4	9.0	9.0	9.2	10.0
E5	5.2	4.4	2.7	1.5	0.0	1.3	2.4	3.5	4.9	5.6	6.2	7.0	7.6	7.6	7.9	8.8
E6	6.5	5.7	4.0	2.7	1.3	0.0	1.2	2.2	3.6	4.3	4.9	5.8	6.5	6.6	7.0	8.0
E7	7.5	6.7	5.1	3.9	2.4	1.2	0.0	1.1	2.4	3.2	3.7	4.6	5.3	5.5	6.0	7.0
E8	8.5	7.8	6.2	5.0	3.5	2.2	1.1	0.0	1.4	2.1	2.7	3.7	4.4	4.6	5.3	6.3
E9	8.0	9.1	7.6	6.3	4.9	3.6	2.4	1.4	0.0	0.7	1.4	2.6	3.4	3.8	4.7	5.8
E10	10.6	9.8	8.3	7.1	5.6	4.3	3.2	2.1	0.7	0.0	0.7	2.1	2.8	3.3	4.3	5.5
E11	7.0	6.3	8.8	7.6	6.2	4.9	3.7	2.7	1.4	0.7	0.0	1.3	2.1	2.7	3.7	4.9
E12	7.5	5.9	9.5	8.4	7.0	5.8	4.6	3.7	2.6	2.1	1.3	0.0	0.7	1.3	2.5	3.6
E13	6.0	6.4	10.1	9.0	7.6	6.5	5.3	4.4	3.4	2.8	2.1	0.7	0.0	0.8	2.0	3.1
E14	4.5	9.3	10.0	9.0	7.6	6.6	5.5	4.6	3.8	3.3	2.7	1.3	0.8	0.0	1.2	2.3
E15	6.5	11.2	10.1	9.2	7.9	7.0	6.0	5.3	4.7	4.3	3.7	2.5	2.0	1.2	0.0	1.2
E16	7.0	11.7	10.7	10.0	8.8	8.0	7.0	6.3	5.8	5.5	4.9	3.6	3.1	2.3	1.2	0.0

附 录

E17	7.5	7.4	11.4	10.7	9.5	8.6	7.6	7.0	6.4	6.0	5.3	4.0	3.4	2.7	1.7	0.7
E18	10.4	10.2	9.2	8.5	9.4	8.7	7.7	7.1	6.7	6.4	5.8	4.5	4.0	3.2	2.0	0.8
E19	9.7	9.6	8.9	8.4	9.4	8.9	8.0	7.7	7.5	7.3	6.8	5.7	5.3	4.4	3.2	2.2
E20	9.2	9.4	9.1	9.0	10.3	10.2	9.7	9.6	9.8	9.8	9.4	8.4	8.1	7.3	6.1	5.3
E21	8.7	8.9	8.6	8.5	9.8	9.7	9.2	9.2	9.4	9.4	9.1	8.1	7.9	7.1	5.9	5.1
E22	8.1	8.3	8.1	8.0	9.5	9.5	9.1	9.1	9.4	9.5	9.2	8.4	8.2	7.4	6.3	5.6
E23	8.8	9.2	9.3	9.6	9.3	9.6	9.4	9.7	10.3	10.5	10.3	9.7	9.6	8.9	7.9	7.4
E24	8.0	8.5	8.9	9.3	9.3	9.7	9.7	10.1	10.9	11.2	11.1	10.6	10.6	9.9	8.9	8.5
E25	7.6	8.2	8.6	9.1	9.2	9.7	9.8	10.3	11.1	11.5	11.4	11.0	11.0	10.3	9.4	9.1
E26	6.7	7.4	8.0	8.6	8.9	9.6	9.8	10.4	11.3	11.7	11.7	11.4	11.5	10.9	10.1	9.8
E27	5.5	6.2	7.0	7.7	8.1	8.8	9.2	9.9	10.9	11.4	11.4	11.2	11.5	10.9	10.2	10.1
E28	3.9	4.8	5.9	6.8	7.5	8.5	9.1	9.9	11.1	11.6	11.8	11.9	12.2	11.7	11.1	11.2
E29	2.8	3.6	4.7	5.7	6.4	7.5	8.1	9.0	10.2	10.8	11.0	11.2	11.5	11.1	10.7	10.9
E30	1.2	2.0	3.3	4.5	5.5	6.7	7.6	8.5	9.8	10.5	10.9	11.2	11.6	11.3	11.1	11.4
E31	3.1	3.0	2.8	3.3	3.7	4.6	5.3	6.1	7.4	8.0	8.3	8.6	9.1	8.7	8.5	8.9
E32	3.4	3.6	3.9	4.5	4.9	5.7	6.3	7.1	8.2	8.8	9.1	9.2	9.6	9.2	8.7	9.0
E33	3.7	4.1	4.4	5.0	5.3	6.2	6.6	7.4	8.5	9.1	9.3	9.3	9.7	9.2	8.8	9.0
E34	4.6	4.9	5.2	5.7	5.9	6.6	6.9	7.6	8.7	9.2	9.3	9.2	9.5	9.0	8.4	8.5
E35	6.0	6.4	6.5	6.8	6.7	7.2	7.3	7.8	8.7	9.1	9.1	8.8	9.0	8.4	7.7	7.6
E36	6.9	7.1	7.0	7.2	6.9	7.2	7.2	7.5	8.3	8.6	8.6	8.2	8.3	7.6	6.9	6.7
E37	7.7	7.9	7.7	7.7	7.2	7.4	7.2	7.4	8.0	8.3	8.1	7.6	7.6	7.0	6.1	5.8
E38	8.3	8.4	8.1	7.9	7.3	7.3	7.0	7.1	7.6	7.8	7.6	6.9	6.9	6.2	5.3	5.0
E39	9.5	9.3	8.6	8.1	7.1	6.7	6.0	5.8	6.0	6.0	5.7	4.9	4.8	4.0	3.1	2.9
E40	9.8	9.6	8.7	8.1	7.0	6.5	5.7	5.4	5.4	5.4	5.0	4.1	4.0	3.3	2.4	2.3
E41	10.2	9.9	8.8	8.1	6.9	6.1	5.2	4.7	4.4	4.3	3.9	2.9	2.8	2.1	1.4	1.9
E42	10.1	9.6	8.4	7.5	6.3	5.4	4.3	3.7	3.4	3.3	2.9	2.1	2.2	1.7	1.7	2.6
E43	10.1	9.5	8.2	7.2	5.9	4.9	3.7	3.0	2.5	2.4	2.0	1.5	1.9	1.8	2.3	3.4
E44	8.9	8.3	6.9	5.9	4.6	3.6	2.5	2.0	2.1	2.4	2.4	2.6	3.1	3.1	3.4	4.4
E45	8.5	7.9	6.4	5.3	3.9	2.8	1.7	1.2	1.7	2.2	2.5	3.1	3.7	3.8	4.2	5.3
E46	7.6	6.9	5.4	4.3	2.9	1.9	1.0	1.2	2.4	3.0	3.4	4.0	4.7	4.7	5.1	6.0
E47	5.3	4.8	3.7	3.1	2.3	2.6	2.9	3.7	4.9	5.5	5.8	6.2	6.7	6.5	6.4	7.1
E48	4.2	3.7	2.5	2.0	1.8	2.7	3.4	4.3	5.7	6.3	6.7	7.2	7.8	7.6	7.6	8.2
E49	3.7	3.4	2.8	2.9	3.0	3.8	4.4	5.3	6.6	7.2	7.5	7.8	8.3	8.0	7.8	8.3
E50	7.1	7.0	6.5	6.3	5.7	5.7	5.4	5.7	6.4	6.7	6.6	6.3	6.4	5.9	5.2	5.3

续表 2 (17 列至 33 列)

E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	E25	E26	E27	E28	E29	E30	E31	E32	E33
7.5	10.4	9.7	9.2	8.7	8.1	8.8	8.0	7.6	6.7	5.5	3.9	2.8	1.2	3.1	3.4	3.7

附 录

7.4	10.2	9.6	9.4	8.9	8.3	9.2	8.5	8.2	7.4	6.2	4.8	3.6	2.0	3.0	3.6	4.1
11.4	9.2	8.9	9.1	8.6	8.1	9.3	8.9	8.6	8.0	7.0	5.9	4.7	3.3	2.8	3.9	4.4
10.7	8.5	8.4	9.0	8.5	8.0	9.6	9.3	9.1	8.6	7.7	6.8	5.7	4.5	3.3	4.5	5.0
9.5	9.4	9.4	10.3	9.8	9.5	9.3	9.3	9.2	8.9	8.1	7.5	6.4	5.5	3.7	4.9	5.3
8.6	8.7	8.9	10.2	9.7	9.5	9.6	9.7	9.7	9.6	8.8	8.5	7.5	6.7	4.6	5.7	6.2
7.6	7.7	8.0	9.7	9.2	9.1	9.4	9.7	9.8	9.8	9.2	9.1	8.1	7.6	5.3	6.3	6.6
7.0	7.1	7.7	9.6	9.2	9.1	9.7	10.1	10.3	10.4	9.9	9.9	9.0	8.5	6.1	7.1	7.4
6.4	6.7	7.5	9.8	9.4	9.4	10.3	10.9	11.1	11.3	10.9	11.1	10.2	9.8	7.4	8.2	8.5
6.0	6.4	7.3	9.8	9.4	9.5	10.5	11.2	11.5	11.7	11.4	11.6	10.8	10.5	8.0	8.8	9.1
5.3	5.8	6.8	9.4	9.1	9.2	10.3	11.1	11.4	11.7	11.4	11.8	11.0	10.9	8.3	9.1	9.3
4.0	4.5	5.7	8.4	8.1	8.4	9.7	10.6	11.0	11.4	11.2	11.9	11.2	11.2	8.6	9.2	9.3
3.4	4.0	5.3	8.1	7.9	8.2	9.6	10.6	11.0	11.5	11.5	12.2	11.5	11.6	9.1	9.6	9.7
2.7	3.2	4.4	7.3	7.1	7.4	8.9	9.9	10.3	10.9	10.9	11.7	11.1	11.3	8.7	9.2	9.2
1.7	2.0	3.2	6.1	5.9	6.3	7.9	8.9	9.4	10.1	10.2	11.1	10.7	11.1	8.5	8.7	8.8
0.7	0.8	2.2	5.3	5.1	5.6	7.4	8.5	9.1	9.8	10.1	11.2	10.9	11.4	8.9	9.0	9.0
0.0	0.7	2.4	5.4	5.4	5.9	7.8	9.0	9.6	10.3	10.6	11.8	11.5	12.1	9.6	9.7	9.6
0.7	0.0	1.6	4.7	4.6	5.2	7.0	8.3	8.9	9.7	10.0	11.3	11.0	11.7	9.3	9.3	9.2
2.4	1.6	0.0	3.1	3.0	3.6	5.5	6.8	7.4	8.3	8.7	10.1	10.0	10.9	8.6	8.4	8.2
5.4	4.7	3.1	0.0	0.5	1.2	3.1	4.5	5.2	6.3	7.0	8.7	9.0	10.2	8.4	7.8	7.5
5.4	4.6	3.0	0.5	0.0	0.7	2.8	4.2	4.9	5.9	6.6	8.3	8.5	9.7	7.9	7.3	7.0
5.9	5.2	3.6	1.2	0.7	0.0	2.1	3.4	4.1	5.1	5.9	7.6	7.8	9.1	7.4	6.7	6.3
7.8	7.0	5.5	3.1	2.8	2.1	0.0	1.4	2.1	3.1	4.0	5.8	6.3	7.7	6.5	5.6	5.1
9.0	8.3	6.8	4.5	4.2	3.4	1.4	0.0	0.7	1.8	2.8	4.6	5.3	6.8	6.1	5.0	4.5
9.6	8.9	7.4	5.2	4.9	4.1	2.1	0.7	0.0	1.1	2.2	4.1	4.8	6.4	5.9	4.8	4.2
10.3	9.7	8.3	6.3	5.9	5.1	3.1	1.8	1.1	0.0	1.2	3.0	3.8	5.5	5.4	4.2	3.7
10.6	10.0	8.7	7.0	6.6	5.9	4.0	2.8	2.2	1.2	0.0	1.9	2.7	4.3	4.4	3.2	2.7
11.8	11.3	10.1	8.7	8.3	7.6	5.8	4.6	4.1	3.0	1.9	0.0	1.2	2.8	3.9	2.8	2.5
11.5	11.0	10.0	9.0	8.5	7.8	6.3	5.3	4.8	3.8	2.7	1.2	0.0	1.7	2.8	2.0	1.9
12.1	11.7	10.9	10.2	9.7	9.1	7.7	6.8	6.4	5.5	4.3	2.8	1.7	0.0	2.6	2.5	2.7
9.6	9.3	8.6	8.4	7.9	7.4	6.5	6.1	5.9	5.4	4.4	3.9	2.8	2.6	0.0	1.2	1.7
9.7	9.3	8.4	7.8	7.3	6.7	5.6	5.0	4.8	4.2	3.2	2.8	2.0	2.5	1.2	0.0	0.5
9.6	9.2	8.2	7.5	7.0	6.3	5.1	4.5	4.2	3.7	2.7	2.5	1.9	2.7	1.7	0.5	0.0
9.2	8.7	7.6	6.7	6.2	5.5	4.3	3.7	3.5	3.0	2.3	2.7	2.4	3.5	2.4	1.3	0.8
8.2	7.6	6.4	5.2	4.7	4.1	2.9	2.5	2.5	2.6	2.5	3.7	3.8	5.0	3.7	2.7	2.3
7.3	6.7	5.4	4.3	3.8	3.2	2.4	2.6	2.8	3.2	3.4	4.7	4.7	5.9	4.2	3.5	3.1
6.4	5.8	4.5	3.5	3.0	2.4	2.3	3.0	3.4	4.0	4.3	5.7	5.7	6.8	5.0	4.3	4.0
5.5	4.9	3.7	3.1	2.5	2.2	2.7	3.7	4.2	4.8	5.1	6.5	6.4	7.4	5.4	5.0	4.7
3.5	3.0	2.3	3.8	3.4	3.5	4.8	5.9	6.4	7.0	7.2	8.3	8.1	8.7	6.4	6.3	6.2
3.0	2.6	2.4	4.4	4.1	4.2	5.6	6.6	7.1	7.7	7.8	8.9	8.5	9.1	6.7	6.7	6.7

附 录

2.6	2.5	3.0	5.5	5.2	5.4	6.8	7.8	8.2	8.8	8.8	9.8	9.3	9.7	7.2	7.4	7.4
3.3	3.4	4.1	6.5	6.2	6.4	7.6	8.5	8.9	9.3	9.3	10.0	9.4	9.6	7.1	7.5	7.5
4.0	4.2	5.0	7.4	7.1	7.2	8.3	9.1	9.5	9.9	9.7	10.3	9.7	9.7	7.2	7.7	7.8
5.1	5.2	5.7	7.7	7.3	7.3	8.1	8.8	9.1	9.3	9.0	9.4	8.7	8.6	6.0	6.7	6.9
5.9	6.0	6.5	8.4	8.0	8.0	8.6	9.2	9.4	9.6	9.2	9.4	8.6	8.3	5.8	6.6	6.9
6.7	6.7	7.0	8.7	8.2	8.1	8.6	8.9	9.1	9.2	8.7	8.7	7.8	7.5	5.0	5.9	6.2
7.8	7.6	7.3	8.0	7.5	7.2	7.0	7.1	7.1	7.0	6.3	6.2	5.3	5.0	2.5	3.4	3.7
9.0	8.7	8.4	9.0	8.4	8.0	7.6	7.5	7.4	7.1	6.3	5.8	4.8	4.2	1.9	3.1	3.5
9.0	8.7	8.2	8.3	7.8	7.3	6.7	6.4	6.3	5.9	5.1	4.7	3.7	3.4	0.8	1.9	2.4
5.9	5.4	4.6	4.7	4.2	3.8	4.0	4.5	4.8	5.1	5.0	5.9	5.6	6.3	4.0	3.8	3.7

续表 2 (34 至 50 列)

E34	E35	E36	E37	E38	E39	E40	E41	E42	E43	E44	E45	E46	E47	E48	E49	E50
4.6	6.0	6.9	7.7	8.3	9.5	9.8	10.2	10.1	10.1	8.9	8.5	7.6	5.3	4.2	3.7	7.1
4.9	6.4	7.1	7.9	8.4	9.3	9.6	9.9	9.6	9.5	8.3	7.9	6.9	4.8	3.7	3.4	7.0
5.2	6.5	7.0	7.7	8.1	8.6	8.7	8.8	8.4	8.2	6.9	6.4	5.4	3.7	2.5	2.8	6.5
5.7	6.8	7.2	7.7	7.9	8.1	8.1	8.1	7.5	7.2	5.9	5.3	4.3	3.1	2.0	2.9	6.3
5.9	6.7	6.9	7.2	7.3	7.1	7.0	6.9	6.3	5.9	4.6	3.9	2.9	2.3	1.8	3.0	5.7
6.6	7.2	7.2	7.4	7.3	6.7	6.5	6.1	5.4	4.9	3.6	2.8	1.9	2.6	2.7	3.8	5.7
6.9	7.3	7.2	7.2	7.0	6.0	5.7	5.2	4.3	3.7	2.5	1.7	1.0	2.9	3.4	4.4	5.4
7.6	7.8	7.5	7.4	7.1	5.8	5.4	4.7	3.7	3.0	2.0	1.2	1.2	3.7	4.3	5.3	5.7
8.7	8.7	8.3	8.0	7.6	6.0	5.4	4.4	3.4	2.5	2.1	1.7	2.4	4.9	5.7	6.6	6.4
9.2	9.1	8.6	8.3	7.8	6.0	5.4	4.3	3.3	2.4	2.4	2.2	3.0	5.5	6.3	7.2	6.7
9.3	9.1	8.6	8.1	7.6	5.7	5.0	3.9	2.9	2.0	2.4	2.5	3.4	5.8	6.7	7.5	6.6
9.2	8.8	8.2	7.6	6.9	4.9	4.1	2.9	2.1	1.5	2.6	3.1	4.0	6.2	7.2	7.8	6.3
9.5	9.0	8.3	7.6	6.9	4.8	4.0	2.8	2.2	1.9	3.1	3.7	4.7	6.7	7.8	8.3	6.4
9.0	8.4	7.6	7.0	6.2	4.0	3.3	2.1	1.7	1.8	3.1	3.8	4.7	6.5	7.6	8.0	5.9
8.4	7.7	6.9	6.1	5.3	3.1	2.4	1.4	1.7	2.3	3.4	4.2	5.1	6.4	7.6	7.8	5.2
8.5	7.6	6.7	5.8	5.0	2.9	2.3	1.9	2.6	3.4	4.4	5.3	6.0	7.1	8.2	8.3	5.3
9.2	8.2	7.3	6.4	5.5	3.5	3.0	2.6	3.3	4.0	5.1	5.9	6.7	7.8	9.0	9.0	5.9
8.7	7.6	6.7	5.8	4.9	3.0	2.6	2.5	3.4	4.2	5.2	6.0	6.7	7.6	8.7	8.7	5.4
7.6	6.4	5.4	4.5	3.7	2.3	2.4	3.0	4.1	5.0	5.7	6.5	7.0	7.3	8.4	8.2	4.6
6.7	5.2	4.3	3.5	3.1	3.8	4.4	5.5	6.5	7.4	7.7	8.4	8.7	8.0	9.0	8.3	4.7
6.2	4.7	3.8	3.0	2.5	3.4	4.1	5.2	6.2	7.1	7.3	8.0	8.2	7.5	8.4	7.8	4.2
5.5	4.1	3.2	2.4	2.2	3.5	4.2	5.4	6.4	7.2	7.3	8.0	8.1	7.2	8.0	7.3	3.8
4.3	2.9	2.4	2.3	2.7	4.8	5.6	6.8	7.6	8.3	8.1	8.6	8.6	7.0	7.6	6.7	4.0
3.7	2.5	2.6	3.0	3.7	5.9	6.6	7.8	8.5	9.1	8.8	9.2	8.9	7.1	7.5	6.4	4.5
3.5	2.5	2.8	3.4	4.2	6.4	7.1	8.2	8.9	9.5	9.1	9.4	9.1	7.1	7.4	6.3	4.8

附 录

3.0	2.6	3.2	4.0	4.8	7.0	7.7	8.8	9.3	9.9	9.3	9.6	9.2	7.0	7.1	5.9	5.1
2.3	2.5	3.4	4.3	5.1	7.2	7.8	8.8	9.3	9.7	9.0	9.2	8.7	6.3	6.3	5.1	5.0
2.7	3.7	4.7	5.7	6.5	8.3	8.9	9.8	10.0	10.3	9.4	9.4	8.7	6.2	5.8	4.7	5.9
2.4	3.8	4.7	5.7	6.4	8.1	8.5	9.3	9.4	9.7	8.7	8.6	7.8	5.3	4.8	3.7	5.6
3.5	5.0	5.9	6.8	7.4	8.7	9.1	9.7	9.6	9.7	8.6	8.3	7.5	5.0	4.2	3.4	6.3
2.4	3.7	4.2	5.0	5.4	6.4	6.7	7.2	7.1	7.2	6.0	5.8	5.0	2.5	1.9	0.8	4.0
1.3	2.7	3.5	4.3	5.0	6.3	6.7	7.4	7.5	7.7	6.7	6.6	5.9	3.4	3.1	1.9	3.8
0.8	2.3	3.1	4.0	4.7	6.2	6.7	7.4	7.5	7.8	6.9	6.9	6.2	3.7	3.5	2.4	3.7
0.0	1.5	2.4	3.3	4.0	5.7	6.2	7.1	7.3	7.7	6.9	7.0	6.4	4.0	4.1	2.9	3.3
1.5	0.0	1.0	1.9	2.8	4.7	5.3	6.3	6.8	7.3	6.7	7.0	6.6	4.6	5.0	3.9	2.5
2.4	1.0	0.0	1.0	1.8	3.8	4.5	5.6	6.1	6.7	6.2	6.6	6.4	4.6	5.2	4.3	1.9
3.3	1.9	1.0	0.0	0.8	3.0	3.7	4.9	5.5	6.2	5.9	6.4	6.3	4.9	5.7	4.9	1.7
4.0	2.8	1.8	0.8	0.0	2.2	3.0	4.1	4.9	5.6	5.4	6.0	6.0	5.0	5.9	5.3	1.7
5.7	4.7	3.8	3.0	2.2	0.0	0.7	1.9	2.8	3.7	3.9	4.6	5.0	5.0	6.1	5.9	2.5
6.2	5.3	4.5	3.7	3.0	0.7	0.0	1.2	2.1	3.0	3.4	4.2	4.7	5.0	6.2	6.1	3.0
7.1	6.3	5.6	4.9	4.1	1.9	1.2	0.0	1.1	2.0	2.7	3.5	4.2	5.2	6.4	6.5	3.8
7.3	6.8	6.1	5.5	4.9	2.8	2.1	1.1	0.0	0.9	1.8	2.6	3.4	4.9	6.0	6.3	4.2
7.7	7.3	6.7	6.2	5.6	3.7	3.0	2.0	0.9	0.0	1.3	2.0	2.9	4.8	5.9	6.4	4.8
6.9	6.7	6.2	5.9	5.4	3.9	3.4	2.7	1.8	1.3	0.0	0.8	1.7	3.6	4.6	5.2	4.3
7.0	7.0	6.6	6.4	6.0	4.6	4.2	3.5	2.6	2.0	0.8	0.0	1.0	3.3	4.2	5.0	4.7
6.4	6.6	6.4	6.3	6.0	5.0	4.7	4.2	3.4	2.9	1.7	1.0	0.0	2.5	3.3	4.2	4.6
4.0	4.6	4.6	4.9	5.0	5.0	5.0	5.2	4.9	4.8	3.6	3.3	2.5	0.0	1.2	1.7	3.3
4.1	5.0	5.2	5.7	5.9	6.1	6.2	6.4	6.0	5.9	4.6	4.2	3.3	1.2	0.0	1.2	4.2
2.9	3.9	4.3	4.9	5.3	5.9	6.1	6.5	6.3	6.4	5.2	5.0	4.2	1.7	1.2	0.0	3.7
3.3	2.5	1.9	1.7	1.7	2.5	3.0	3.8	4.2	4.8	4.3	4.7	4.6	3.3	4.2	3.7	0.0

表 3 不同资源间物流成本 (1 至 16 列)

企业 编号	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16
E1	0.0	2.1	5.4	8.0	10.5	11.0	13.0	15.0	14.0	19.1	12.0	13.0	10.0	9.0	13.0	14.0
E2	2.1	0.0	3.4	6.1	8.7	11.3	13.4	15.5	18.2	19.7	12.6	11.7	12.8	18.5	22.4	23.5
E3	5.4	3.4	0.0	2.7	5.4	8.1	10.3	12.4	15.1	16.6	17.6	18.9	20.1	20.0	15.1	21.5
E4	8.0	6.1	2.7	0.0	2.9	5.5	7.8	9.9	12.6	14.1	15.2	16.7	18.0	18.0	18.4	15.9
E5	8.5	8.7	5.4	2.9	0.0	2.6	4.9	7.0	9.7	11.2	12.3	13.9	15.2	15.3	15.8	13.5
E6	11.0	11.3	8.1	5.5	2.6	0.0	2.4	4.5	7.2	8.7	9.8	11.6	13.0	13.2	14.1	16.0
E7	13.0	13.4	10.3	7.8	4.9	2.4	0.0	2.1	4.9	6.3	7.5	9.2	10.6	10.9	11.9	13.9
E8	15.0	15.5	12.4	9.9	7.0	4.5	2.1	0.0	2.7	4.2	5.4	7.3	8.7	9.3	10.5	12.7
E9	14.0	18.2	15.1	12.6	9.7	7.2	4.9	2.7	0.0	1.5	2.8	5.2	6.7	7.6	9.4	11.7
E10	19.1	19.7	16.6	14.1	11.2	8.7	6.3	4.2	1.5	0.0	1.5	4.1	5.6	6.7	8.7	11.0

附 录

E11	12.0	12.6	17.6	15.2	12.3	9.8	7.5	5.4	2.8	1.5	0.0	2.7	4.1	5.3	7.5	9.8
E12	13.0	11.7	18.9	16.7	13.9	11.6	9.2	7.3	5.2	4.1	2.7	0.0	1.5	2.7	5.0	7.3
E13	10.0	12.8	20.1	18.0	15.2	13.0	10.6	8.7	6.7	5.6	4.1	1.5	0.0	1.7	4.1	6.3
E14	9.0	18.5	20.0	18.0	15.3	13.2	10.9	9.3	7.6	6.7	5.3	2.7	1.7	0.0	2.4	4.6
E15	13.0	22.4	15.1	18.4	15.8	14.1	11.9	10.5	9.4	8.7	7.5	5.0	4.1	2.4	0.0	2.4
E16	14.0	23.5	21.5	15.9	13.5	16.0	13.9	12.7	11.7	11.0	9.8	7.3	6.3	4.6	2.4	0.0
E17	10.0	14.9	22.9	17.3	14.9	17.3	15.2	13.9	12.7	12.0	10.7	8.1	6.9	5.4	3.4	1.4
E18	19.7	19.3	17.5	17.1	14.8	17.3	15.4	14.3	13.3	12.7	11.5	9.0	7.9	6.3	4.1	1.7
E19	18.3	18.2	16.7	16.7	14.7	17.7	16.1	15.3	15.0	14.7	13.6	11.3	10.5	8.9	6.5	4.5
E20	17.4	17.8	17.3	18.0	16.7	20.4	19.4	19.2	19.5	19.6	18.8	16.8	16.3	14.6	12.3	10.5
E21	16.4	16.8	16.2	16.9	15.7	19.4	18.4	18.3	18.8	18.9	18.1	16.3	15.8	14.2	11.9	10.3
E22	15.1	15.6	15.2	16.1	15.0	19.0	18.1	18.2	18.9	19.1	18.4	16.7	16.4	14.8	12.6	11.2
E23	17.6	13.4	13.7	15.1	14.6	19.1	18.8	19.3	15.5	17.0	16.6	15.3	15.2	13.7	15.7	14.7
E24	16.0	17.1	17.8	18.6	18.5	19.4	19.4	20.2	16.7	18.3	18.1	17.1	17.2	15.8	13.9	13.1
E25	15.1	16.3	17.3	18.3	18.4	19.5	19.7	20.6	17.2	18.9	18.8	17.9	18.1	16.7	14.9	14.2
E26	13.3	14.7	16.0	17.3	17.8	19.1	19.6	20.7	17.6	19.4	19.4	18.8	19.0	17.8	16.1	15.7
E27	11.0	12.4	13.9	15.4	16.1	17.7	18.4	19.7	16.8	18.7	18.9	18.5	18.9	17.8	16.3	16.1
E28	7.8	9.6	11.7	13.7	15.1	17.0	18.2	19.8	17.2	19.3	19.7	19.7	20.3	19.4	18.3	18.4
E29	5.7	7.3	9.3	11.3	12.8	14.9	16.2	18.0	15.4	17.6	18.1	18.3	19.1	18.3	17.3	17.7
E30	2.3	4.0	6.6	9.0	11.0	13.4	15.1	17.1	19.7	17.0	17.7	18.4	19.3	18.7	18.1	18.8
E31	6.2	6.0	5.7	6.6	7.4	9.3	10.5	12.3	14.8	16.1	16.7	17.2	18.1	17.5	13.0	13.8
E32	6.7	7.3	7.8	8.9	9.7	11.5	12.5	14.1	16.5	17.7	18.1	18.3	19.1	18.3	17.5	18.0
E33	7.5	8.2	8.8	10.0	10.7	12.3	13.3	14.8	17.1	18.2	18.6	18.7	19.4	18.5	17.5	18.0
E34	9.1	9.9	10.4	11.4	11.8	13.2	13.9	15.2	17.3	18.3	18.6	18.4	19.0	18.0	16.9	17.1
E35	12.1	12.8	13.0	13.6	13.5	14.4	14.6	15.6	17.4	18.2	18.2	17.6	18.0	16.8	15.3	15.2
E36	13.7	14.2	14.1	14.4	13.8	14.5	14.3	15.1	16.6	17.3	17.2	16.3	16.6	15.3	13.7	13.4
E37	15.4	15.8	15.4	15.3	14.5	14.8	14.3	14.8	16.0	16.6	16.3	15.2	15.3	13.9	12.2	11.7
E38	16.7	16.9	16.1	15.8	14.7	14.6	13.9	14.2	15.2	15.6	15.2	13.9	13.9	12.4	10.6	10.0
E39	18.9	18.6	17.1	16.1	14.2	13.4	12.0	11.6	11.9	12.0	11.4	9.7	9.6	8.1	6.1	5.8
E40	19.5	19.1	17.3	16.1	14.0	12.9	11.4	10.7	10.8	10.7	10.0	8.3	8.1	6.6	4.7	4.6
E41	20.5	19.8	17.7	16.1	13.7	12.3	10.3	9.4	8.9	8.7	7.8	5.9	5.7	4.2	2.7	3.8
E42	20.1	19.3	16.9	15.1	12.5	10.7	8.7	7.5	6.8	6.6	5.7	4.2	4.4	3.4	3.3	5.3
E43	20.1	19.1	16.5	14.5	11.7	9.7	7.5	6.0	5.0	4.8	4.0	3.0	3.8	3.5	4.5	6.7
E44	17.7	16.6	13.9	11.9	9.1	7.2	5.1	4.0	4.3	4.8	4.9	5.2	6.3	6.1	6.9	8.9
E45	17.0	15.7	12.8	10.6	7.8	5.7	3.4	2.4	3.4	4.4	5.0	6.1	7.4	7.6	8.5	10.5
E46	15.2	13.8	10.9	8.7	5.9	3.9	2.0	2.4	4.7	6.0	6.8	8.1	9.3	9.4	10.2	12.1
E47	10.5	9.6	7.3	6.1	4.7	5.3	5.8	7.4	9.8	11.0	11.7	12.4	13.4	13.0	12.9	14.1
E48	8.5	7.3	5.0	4.1	3.6	5.4	6.8	8.7	11.3	12.7	13.5	14.4	15.5	15.2	15.2	16.5
E49	7.5	6.8	5.6	5.8	6.0	7.7	8.9	10.6	13.1	14.4	15.0	15.6	16.6	16.0	15.7	16.7

附 录

E50	14.1	14.1	13.0	12.6	11.3	11.4	10.9	11.4	12.8	13.4	13.3	12.5	12.9	11.7	10.4	10.5
-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

续表 3 (17 至 33 列)

E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	E25	E26	E27	E28	E29	E30	E31	E32	E33
10.0	19.7	18.3	17.4	16.4	15.1	17.6	16.0	15.1	13.3	11.0	7.8	5.7	2.3	6.2	6.7	7.5
14.9	19.3	18.2	17.8	16.8	15.6	13.4	17.1	16.3	14.7	12.4	9.6	7.3	4.0	6.0	7.3	8.2
22.9	17.5	16.7	17.3	16.2	15.2	13.7	17.8	17.3	16.0	13.9	11.7	9.3	6.6	5.7	7.8	8.8
17.3	17.1	16.7	18.0	16.9	16.1	15.1	18.6	18.3	17.3	15.4	13.7	11.3	9.0	6.6	8.9	10.0
14.9	14.8	14.7	16.7	15.7	15.0	14.6	18.5	18.4	17.8	16.1	15.1	12.8	11.0	7.4	9.7	10.7
17.3	17.3	17.7	20.4	19.4	19.0	19.1	19.4	19.5	19.1	17.7	17.0	14.9	13.4	9.3	11.5	12.3
15.2	15.4	16.1	19.4	18.4	18.1	18.8	19.4	19.7	19.6	18.4	18.2	16.2	15.1	10.5	12.5	13.3
13.9	14.3	15.3	19.2	18.3	18.2	19.3	20.2	20.6	20.7	19.7	19.8	18.0	17.1	12.3	14.1	14.8
12.7	13.3	15.0	19.5	18.8	18.9	15.5	16.7	17.2	17.6	16.8	17.2	15.4	19.7	14.8	16.5	17.1
12.0	12.7	14.7	19.6	18.9	19.1	17.0	18.3	18.9	19.4	18.7	19.3	17.6	17.0	16.1	17.7	18.2
10.7	11.5	13.6	18.8	18.1	18.4	16.6	18.1	18.8	19.4	18.9	19.7	18.1	17.7	16.7	18.1	18.6
8.1	9.0	11.3	16.8	16.3	16.7	15.3	17.1	17.9	18.8	18.5	19.7	18.3	18.4	17.2	18.3	18.7
6.9	7.9	10.5	16.3	15.8	16.4	15.2	17.2	18.1	19.0	18.9	20.3	19.1	19.3	18.1	19.1	19.4
5.4	6.3	8.9	14.6	14.2	14.8	17.7	19.8	20.7	21.8	21.8	23.4	22.3	22.7	17.5	18.3	18.5
3.4	4.1	6.5	12.3	11.9	12.6	15.7	13.9	14.9	16.1	16.3	18.3	17.3	18.1	17.0	17.5	17.5
1.4	1.7	4.5	10.5	10.3	11.2	14.7	13.1	14.2	15.7	16.1	18.4	17.7	18.8	17.8	18.0	18.0
0.0	1.5	4.8	10.9	10.8	11.8	15.5	14.0	15.1	16.7	17.3	19.6	19.0	20.2	19.2	19.4	19.3
1.5	0.0	3.3	9.4	9.3	10.3	14.1	12.6	13.8	15.4	16.1	18.6	18.1	19.4	18.5	18.5	18.3
4.8	3.3	0.0	6.1	6.0	7.1	11.0	13.6	14.9	16.6	17.5	20.3	20.1	21.8	17.2	16.8	16.5
10.9	9.4	6.1	0.0	1.1	2.4	6.3	9.0	10.4	12.5	14.1	17.5	18.0	20.4	16.9	15.7	15.0
10.8	9.3	6.0	1.1	0.0	1.5	5.6	8.4	9.7	11.8	13.2	16.6	17.0	19.4	15.8	14.6	14.0
11.8	10.3	7.1	2.4	1.5	0.0	4.1	6.9	8.2	10.3	11.7	15.1	15.6	18.1	14.8	13.4	12.7
15.5	14.1	11.0	6.3	5.6	4.1	0.0	2.8	4.1	6.3	8.0	11.6	12.5	15.4	13.0	11.2	10.3
14.0	12.6	13.6	9.0	8.4	6.9	2.8	0.0	1.4	3.6	5.6	9.3	10.6	13.7	12.2	10.0	9.0
15.1	13.8	14.9	10.4	9.7	8.2	4.1	1.4	0.0	2.3	4.4	8.1	9.6	12.8	11.8	9.5	8.5
16.7	15.4	16.6	12.5	11.8	10.3	6.3	3.6	2.3	0.0	2.4	6.0	7.7	11.0	10.7	8.4	7.3
17.3	16.1	17.5	14.1	13.2	11.7	8.0	5.6	4.4	2.4	0.0	3.7	5.3	8.7	8.9	6.5	5.5
19.6	18.6	20.3	17.5	16.6	15.1	11.6	9.3	8.1	6.0	3.7	0.0	2.4	5.6	7.8	5.7	5.1
19.0	18.1	20.1	18.0	17.0	15.6	12.5	10.6	9.6	7.7	5.3	2.4	0.0	3.3	5.7	4.0	3.8
20.2	19.4	21.8	20.4	19.4	18.1	15.4	13.7	12.8	11.0	8.7	5.6	3.3	0.0	5.2	5.0	5.5
15.2	14.5	17.2	16.9	15.8	14.8	13.0	12.2	11.8	10.7	8.9	7.8	5.7	5.2	0.0	2.4	3.4
19.4	18.5	16.8	15.7	14.6	13.4	11.2	10.0	9.5	8.4	6.5	5.7	4.0	5.0	2.4	0.0	1.1
19.3	18.3	16.5	15.0	14.0	12.7	10.3	9.0	8.5	7.3	5.5	5.1	3.8	5.5	3.4	1.1	0.0
18.3	17.3	15.3	13.4	12.4	11.1	8.6	7.4	6.9	6.0	4.5	5.4	4.8	7.0	4.9	2.7	1.7

附 录

16.3	15.2	12.8	10.5	9.5	8.1	5.7	5.1	5.1	5.2	5.0	7.5	7.5	10.0	7.3	5.5	4.6
14.5	13.3	10.9	8.7	7.7	6.4	4.8	5.1	5.7	6.5	6.7	9.4	9.4	11.7	8.5	7.0	6.3
12.7	11.5	9.0	7.0	6.0	4.9	4.5	5.9	6.8	8.0	8.6	11.3	11.4	13.5	9.9	8.7	8.1
11.0	9.8	7.3	6.1	5.1	4.3	5.5	7.3	8.3	9.7	10.3	13.0	12.9	14.9	10.9	9.9	9.4
7.0	6.0	4.6	7.6	6.9	7.1	9.7	11.7	12.7	14.0	14.4	16.7	16.1	17.5	12.7	12.6	12.4
6.0	5.2	4.8	8.8	8.1	8.5	11.2	13.2	14.2	15.4	15.7	17.8	17.1	18.2	13.3	13.4	13.3
5.2	5.1	6.1	11.0	10.4	10.9	13.6	15.5	16.5	17.6	17.7	19.5	18.6	19.4	14.3	14.8	14.8
6.6	6.8	8.2	13.0	12.4	12.7	15.2	16.9	17.8	18.7	18.5	20.0	18.9	19.3	14.1	14.9	15.1
7.9	8.4	9.9	14.8	14.1	14.4	16.7	18.3	19.1	19.8	19.5	20.7	19.4	19.5	14.3	15.4	15.7
10.2	10.3	11.3	15.4	14.6	14.6	16.3	17.5	18.1	18.6	18.0	18.9	17.3	17.2	12.1	13.3	13.8
11.8	12.0	13.0	16.9	16.0	16.0	17.3	18.4	18.8	19.2	18.3	18.8	17.2	16.7	11.7	13.2	13.7
13.4	13.5	14.1	17.4	16.5	16.2	17.1	17.9	18.2	18.3	17.3	17.5	15.7	15.0	10.1	11.8	12.4
15.6	15.2	14.6	16.1	15.0	14.3	14.0	14.1	14.2	13.9	12.6	12.4	10.6	10.0	5.0	6.7	7.5
17.9	17.5	16.9	17.9	16.9	16.1	15.2	15.0	14.8	14.1	12.5	11.7	9.5	8.4	3.9	6.1	7.1
18.1	17.5	16.4	16.7	15.6	14.6	13.4	12.8	12.6	11.8	10.2	9.4	7.4	6.7	1.7	3.8	4.7
11.8	10.9	9.2	9.4	8.4	7.7	8.0	9.0	9.5	10.2	10.0	11.9	11.2	12.6	8.1	7.7	7.5

续表 3 (34 至 50 列)

E34	E35	E36	E37	E38	E39	E40	E41	E42	E43	E44	E45	E46	E47	E48	E49	E50
9.1	12.1	13.7	15.4	16.7	18.9	19.5	20.5	20.1	20.1	17.7	17.0	15.2	10.5	8.5	7.5	14.1
9.9	12.8	14.2	15.8	16.9	18.6	19.1	19.8	19.3	19.1	16.6	15.7	13.8	9.6	7.3	6.8	14.1
10.4	13.0	14.1	15.4	16.1	17.1	17.3	17.7	16.9	16.5	13.9	12.8	10.9	7.3	5.0	5.6	13.0
11.4	13.6	14.4	15.3	15.8	16.1	16.1	16.1	15.1	14.5	11.9	10.6	8.7	6.1	4.1	5.8	12.6
11.8	13.5	13.8	14.5	14.7	14.2	14.0	13.7	12.5	11.7	9.1	7.8	5.9	4.7	3.6	6.0	11.3
13.2	14.4	14.5	14.8	14.6	13.4	12.9	12.3	10.7	9.7	7.2	5.7	3.9	5.3	5.4	7.7	11.4
13.9	14.6	14.3	14.3	13.9	12.0	11.4	10.3	8.7	7.5	5.1	3.4	2.0	5.8	6.8	8.9	10.9
15.2	15.6	15.1	14.8	14.2	11.6	10.7	9.4	7.5	6.0	4.0	2.4	2.4	7.4	8.7	10.6	11.4
17.3	17.4	16.6	16.0	15.2	11.9	10.8	8.9	6.8	5.0	4.3	3.4	4.7	9.8	11.3	13.1	12.8
18.3	18.2	17.3	16.6	15.6	12.0	10.7	8.7	6.6	4.8	4.8	4.4	6.0	11.0	12.7	14.4	13.4
18.6	18.2	17.2	16.3	15.2	11.4	10.0	7.8	5.7	4.0	4.9	5.0	6.8	11.7	13.5	15.0	13.3
18.4	17.6	16.3	15.2	13.9	9.7	8.3	5.9	4.2	3.0	5.2	6.1	8.1	12.4	14.4	15.6	12.5
19.0	18.0	16.6	15.3	13.9	9.6	8.1	5.7	4.4	3.8	6.3	7.4	9.3	13.4	15.5	16.6	12.9
18.0	16.8	15.3	13.9	12.4	8.1	6.6	4.2	3.4	3.5	6.1	7.6	9.4	13.0	15.2	16.0	11.7
16.9	15.3	13.7	12.2	10.6	6.1	4.7	2.7	3.3	4.5	6.9	8.5	10.2	12.9	15.2	15.7	10.4
17.1	15.2	13.4	11.7	10.0	5.8	4.6	3.8	5.3	6.7	8.9	10.5	12.1	14.1	16.5	16.7	10.5
18.3	16.3	14.5	12.7	11.0	7.0	6.0	5.2	6.6	7.9	10.2	11.8	13.4	15.6	17.9	18.1	11.8
17.3	15.2	13.3	11.5	9.8	6.0	5.2	5.1	6.8	8.4	10.3	12.0	13.5	15.2	17.5	17.5	10.9
15.3	12.8	10.9	9.0	7.3	4.6	4.8	6.1	8.2	9.9	11.3	13.0	14.1	14.6	16.9	16.4	9.2

附 录

13.4	10.5	8.7	7.0	6.1	7.6	8.8	11.0	13.0	14.8	15.4	16.9	17.4	16.1	17.9	16.7	9.4
12.4	9.5	7.7	6.0	5.1	6.9	8.1	10.4	12.4	14.1	14.6	16.0	16.5	15.0	16.9	15.6	8.4
11.1	8.1	6.4	4.9	4.3	7.1	8.5	10.9	12.7	14.4	14.6	16.0	16.2	14.3	16.1	14.6	7.7
8.6	5.7	4.8	4.5	5.5	9.7	11.2	13.6	15.2	16.7	16.3	17.3	17.1	14.0	15.2	13.4	8.0
7.4	5.1	5.1	5.9	7.3	11.7	13.2	15.5	16.9	18.3	17.5	18.4	17.9	14.1	15.0	12.8	9.0
6.9	5.1	5.7	6.8	8.3	12.7	14.2	16.5	17.8	19.1	18.1	18.8	18.2	14.2	14.8	12.6	9.5
6.0	5.2	6.5	8.0	9.7	14.0	15.4	17.6	18.7	19.8	18.6	19.2	18.3	13.9	14.1	11.8	10.2
4.5	5.0	6.7	8.6	10.3	14.4	15.7	17.7	18.5	19.5	18.0	18.3	17.3	12.6	12.5	10.2	10.0
5.4	7.5	9.4	11.3	13.0	16.7	17.8	19.5	20.0	20.7	18.9	18.8	17.5	12.4	11.7	9.4	11.9
4.8	7.5	9.4	11.4	12.9	16.1	17.1	18.6	18.9	19.4	17.3	17.2	15.7	10.6	9.5	7.4	11.2
7.0	10.0	11.7	13.5	14.9	17.5	18.2	19.4	19.3	19.5	17.2	16.7	15.0	10.0	8.4	6.7	12.6
4.9	7.3	8.5	9.9	10.9	12.7	13.3	14.3	14.1	14.3	12.1	11.7	10.1	5.0	3.9	1.7	8.1
2.7	5.5	7.0	8.7	9.9	12.6	13.4	14.8	14.9	15.4	13.3	13.2	11.8	6.7	6.1	3.8	7.7
1.7	4.6	6.3	8.1	9.4	12.4	13.3	14.8	15.1	15.7	13.8	13.7	12.4	7.5	7.1	4.7	7.5
0.0	3.0	4.7	6.6	8.1	11.4	12.5	14.1	14.7	15.4	13.7	13.9	12.8	8.1	8.1	5.8	6.5
3.0	0.0	1.9	3.9	5.5	9.4	10.7	12.7	13.6	14.7	13.4	14.0	13.2	9.2	9.9	7.8	5.1
4.7	1.9	0.0	1.9	3.6	7.7	9.0	11.1	12.2	13.4	12.5	13.2	12.8	9.3	10.5	8.7	3.9
6.6	3.9	1.9	0.0	1.7	6.0	7.5	9.7	11.0	12.4	11.8	12.8	12.6	9.8	11.3	9.8	3.4
8.1	5.5	3.6	1.7	0.0	4.4	5.9	8.2	9.7	11.2	10.9	12.0	12.1	10.0	11.8	10.5	3.3
11.4	9.4	7.7	6.0	4.4	0.0	1.5	3.9	5.7	7.3	7.8	9.3	10.0	10.0	12.2	11.8	4.9
12.5	10.7	9.0	7.5	5.9	1.5	0.0	2.4	4.3	6.0	6.8	8.4	9.4	10.1	12.4	12.3	5.9
14.1	12.7	11.1	9.7	8.2	3.9	2.4	0.0	2.1	3.9	5.4	7.1	8.4	10.4	12.7	13.0	7.7
14.7	13.6	12.2	11.0	9.7	5.7	4.3	2.1	0.0	1.8	3.6	5.3	6.9	9.7	12.0	12.7	8.5
15.4	14.7	13.4	12.4	11.2	7.3	6.0	3.9	1.8	0.0	2.6	4.1	5.9	9.6	11.8	12.8	9.6
13.7	13.4	12.5	11.8	10.9	7.8	6.8	5.4	3.6	2.6	0.0	1.7	3.3	7.2	9.3	10.5	8.6
13.9	14.0	13.2	12.8	12.0	9.3	8.4	7.1	5.3	4.1	1.7	0.0	1.9	6.7	8.5	10.0	9.4
12.8	13.2	12.8	12.6	12.1	10.0	9.4	8.4	6.9	5.9	3.3	1.9	0.0	5.1	6.7	8.4	9.2
8.1	9.2	9.3	9.8	10.0	10.0	10.1	10.4	9.7	9.6	7.2	6.7	5.1	0.0	2.4	3.3	6.7
8.1	9.9	10.5	11.3	11.8	12.2	12.4	12.7	12.0	11.8	9.3	8.5	6.7	2.4	0.0	2.4	8.5
5.8	7.8	8.7	9.8	10.5	11.8	12.3	13.0	12.7	12.8	10.5	10.0	8.4	3.3	2.4	0.0	7.5
6.5	5.1	3.9	3.4	3.3	4.9	5.9	7.7	8.5	9.6	8.6	9.4	9.2	6.7	8.5	7.5	0.0

表 4 二级制造任务 F_{ij} 的候选资源

编号为 1 的二级制造任务	编号为 2 的二级制造任务	编号为 3 的二级制造任务	编号为 4 的二级制造任务	编号为 5 的二级制造任务
1	2	1	2	1
3	5	3	4	4
5	7	8	6	6
7	10	10	8	8
12	13	12	11	9
14	17	16	13	16
16	20	19	15	17
19	23	22	17	20
24	25	24	21	21
26	27	26	23	24
29	30	28	26	27
32	31	30	29	28
34	35	34	31	33
37	36	35	32	38
40	38	36	33	40
41	39	39	37	41
45	44	42	39	43
46	47	44	42	45
47	48	46	43	46
49	50	49	48	50
15	18	20	18	25

表 5 初始 50 组资源服务加工能力相关信息

资源 编 号	二 级 制 造 任 务	二级制造任务类型 1			二级制造任务类型 2			二级制造任务类型 3			二级制造任务类型 4			二级制造任务类型 5		
		加工 时间	加工 成本	服务 效率	加工 时间	加工 成本	服务 效率	加工 时间	加工 成本	服务 效率	加工 时间	加工 成本	服务 效率	加工 时间	加工 成本	服务 效率
E1		12.3	28.3	0.42				11.6	15.9	0.75				16.1	18.1	0.85
E2					10.3	28.2	0.60				14.8	28.4	0.32			
E3		18.7	29.9	0.57				12.2	19.6	0.56						
E4											18.1	20.4	0.60	9.3	28.7	0.60
E5		10.3	19.6	0.88	14.1	21.5	0.68									
E6											12.1	61.8	0.52	15.7	15.0	0.36
E7		10.3	18.0	0.86	8.8	24.8	0.96									
E8								20.4	15.1	0.43	14.3	29.3	0.41	15.0	16.7	0.49
E9														10.5	22.7	0.41
E10					12.3	18.3	0.59	18.6	18.1	0.60						
E11											8.6	25.2	0.43			

附 录

E12	10.7	22.2	0.64				10.8	19.1	0.64						
E13				14.3	20.1	0.99				13.1	19.4	0.60			
E14	9.4	21.2	0.58												
E15	10.6	15.7	0.67							11.5	18.1	0.37			
E16	12.8	13.3	0.59				11.9	25.2	0.38				11.7	17.4	0.50
E17				18.6	20.7	0.51				13.1	25.1	0.72	13.7	19.1	0.61
E18				9.6	20.7	0.79				10.9	20.6	0.63			
E19	16.8	16.9	0.76				16.1	17.5	0.71						
E20				7.1	36.0	0.77	12.9	18.6	0.46				8.9	30.0	0.67
E21										17.2	9.8	0.79	13.6	18.5	0.62
E22							6.6	27.1	0.57						
E23				11.5	17.8	0.68				11.5	22.1	0.79			
E24	8.7	28.0	0.74				15.6	13.6	0.71				10.4	24.5	0.91
E25				18.8	12.2	0.79							10.9	18.6	0.66
E26	16.8	19.5	0.50				14.5	16.8	0.48	12.6	20.2	0.75			
E27				12.6	26.0	0.77							17.8	15.7	0.96
E28							7.6	23.2	0.50				18.3	27.8	0.75
E29	17.4	11.9	0.60							14.8	17.7	0.32			
E30				12.6	34.4	0.42	8.1	33.2	0.73						
E31				13.8	25.0	0.39				10.1	33.3	0.35			
E32	12.2	16.3	0.31							10.1	26.8	0.52			
E33										14.8	24.0	0.67	10.97	15.2	0.97
E34	17.4	21.5	0.99				15.6	21.6	0.49						
E35				12.8	34.1	0.98	12.8	12.9	0.88						
E36				7.6	19.7	0.42	12.7	23.2	0.99						
E37	20.6	13.5	0.42							17.4	24.9	0.76			
E38				13.9	29.9	0.32							21.9	33.4	0.47
E39				12.6	18.1	0.69	15.9	29.6	0.81	11.9	15.1	0.59			
E40	18.0	28.8	0.37										10.4	27.7	0.77
E41	12.2	18.7	0.56										12.2	20.7	0.50
E42							12.1	16.3	0.54	11.2	24.5	0.87			
E43										17.0	23.9	0.80	13.4	25.5	0.77
E44				13.0	19.6	0.92	12.8	12.9	0.71						
E45	12.8	20.8	0.44										12.8	16.6	0.79
E46	18.9	19.7	0.64				19.9	30.7	0.38				13.5	22.9	0.35
E47	16.6	35.2	0.54	12.5	25.8	0.77									
E48				12.6	22.5	0.43				14.0	24.2	0.98			
E49	17.6	20.6	0.97				15.7	16.5	0.93						
E50				12.0	20.3	0.56							11.9	18.4	0.48

表 6 各资源可靠度数据

资源	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17
可靠度	122	118	162	116	137	139	117	105	118	112	107	192	163	126	138	153	128
资源	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	E25	E26	E27	E28	E29	E30	E31	E32	E33	E34
可靠度	136	96	107	126	135	160	162	120	120	116	144	117	152	96	118	166	129
资源	E35	E36	E37	E38	E39	E40	E41	E42	E43	E44	E45	E46	E47	E48	E49	E50	
可靠度	141	180	156	144	120	134	156	143	142	143	157	156	143	152	134	160	

表 7 相关资源属性改变后数据

资源 编号	二级 制造 任务	二级制造任务类型 1			二级制造任务类型 2			二级制造任务类型 3			二级制造任务类型 4			二级制造任务类型 5		
		加工 时间	加工 成本	服务 效率	加工 时间	加工 成本	服务 效率	加工 时间	加工 成本	服务 效率	加工 时间	加工 成本	服务 效率	加工 时间	加工 成本	服务 效率
E5		9.3	19.6	0.92	12.1	21.5	0.88									
E12		10.7	22.2	0.44				12.8	19.1	0.54						
E20					6.5	36.0	0.93	11.9	18.6	0.66				8.5	30.0	0.77
E27					14.6	26.0	0.69							18.4	15.7	0.86

表 8 新增资源相关数据

资源 编号	二级 制造 任务	二级制造任务类型 1			二级制造任务类型 2			二级制造任务类型 3			二级制造任务类型 4			二级制造任务类型 5		
		加工 时间	加工 成本	服务 效率	加工 时间	加工 成本	服务 效率	加工 时间	加工 成本	服务 效率	加工 时间	加工 成本	服务 效率	加工 时间	加工 成本	服务 效率
E51		16.0	21.9	0.82				11.9	26.9	0.47						
E52					11.8	13.9	0.83				11.9	15.1	0.59			
E53		12.1	21.8	0.52										12.8	12.9	0.71
E54					12.7	18.3	0.65				13.6	13.6	0.71			
E55								10.8	24.8	0.96				14.6	18.1	0.69

作者简介

朱非凡，男，1992 年 10 月出生，汉族

工作单位：长春工业大学

攻读硕士期间研究成果

一、学位论文发表情况

- [1] Scheduling of manufacturers based on chaos optimization algorithm in cloud manufacturing. Robotics and Computer Integrated Manufacturing.2019,58:13-20.(SCI 已录用), 第二作者.
- [2] Research on optimal decision-making of Cloud manufacturing service provider based on Grey Correlation Analysis and TOPSIS International.Journal of Production Research, 2019, (SCI 已录用), 参与者.
- [3] 《云制造环境下的资源调度研究综述》制造技术与机床, 2018, 第二作者.
- [4] 《云制造资源优化配置研究综述》制造技术与机床, 2017, 第三作者.

二、参与项目情况

- [1] 国家自然科学基金项目:“云制造环境下可制造性评价理论与方法研究”(项目编号: 51405030, 参与)
- [2] 吉林省青年基金项目:“基于智能算法的面向云制造的可制造性评价技术研究”(项目编号: 20160520069JH, 参与)
- [3] 吉林省教育厅项目:“云制造环境下制造资源优化配置研究”(项目编号: JJKH20170557KJ, 参与)