


基于多智能体的多型号 生产调度技术研究

李敬花 著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

基于多智能体的多型号生产调度 技术研究

李敬花 著

 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

多项目调度问题是指在同时满足任务工艺间的时序约束和资源限制的约束的前提下,如何把有限的资源协同分配给多项目的多个任务,以满足不同的优化目标。本书详细分析当前生产控制模式、项目调度和 MAS 技术的研究现状,以多型号产品生产的计划与调度优化为目标,对支持多型号生产调度运行模式的 Agent 模型、基于 ECNP 的多型号协作规划、资源受限多型号调度优化、多型号资源能力平衡以及多 Agent 的多型号生产调度系统等五方面进行了研究。

本书可作为高等院校船舶与海洋工程、计算机、信息工程、自动化等专业研究生、高年级本科生的参考用书,也可供从事人工智能与项目调度优化领域的科研人员提供借鉴与参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于多智能体的多型号生产调度技术研究/李敬花
著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2017. 1
ISBN 978 - 7 - 5661 - 1407 - 5

I. ①基… II. ①李… III. ①机械工业 - 生产调度 -
智能制造系统 IV. ①F407.4 ②TH166

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 320010 号

选题策划 史大伟
责任编辑 张玮琪
封面设计 博鑫印务

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 北京中石油彩色印刷有限责任公司
开 本 787 mm × 960 mm 1/16
印 张 7.25
字 数 156 千字
版 次 2017 年 1 月第 1 版
印 次 2017 年 1 月第 1 次印刷
定 价 29.80 元

<http://www.hrbeupress.com>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

生产调度是一种有效的资源配置和优化手段,涉及管理科学、机械工程、应用数学等多个学科,目的是通过作业的均衡分配,加工次序的合理安排,在满足系统约束条件的前提下优化相关性能指标。生产调度作为目前各种先进制造模式的核心内容之一,逐渐成为了人们关注的热点。

在大型复杂产品制造领域,如航空航天制造、军工制造、船舶制造、大型科研项目研制等行业,普遍存在着众多的多型号并存的生产模式,这些行业对国民经济有着重要的影响。传统的生产调度系统不适合多型号生产模式,需要一种多型号调度系统来控制组织分散、决策分散的分布式多型号生产,但是目前对于多型号生产管理研究却不多见。

MAS(Multi-Agent System),即多智能体系统十分适合处理分布式问题。国内外学者们大多将 Agent 技术应用于车间的调度控制,很少有将 MAS 与多型号生产调度运行模式相结合的研究成果,因此基于 Agent 的多项目调度有着很广阔的研究空间。

本书提出了基于多 Agent 的多型号生产调度系统中若干关键技术的解决方案,在此基础上设计了 MPPSS(Multi-agent based multi-project production scheduling system),即基于多 Agent 的多型号生产调度系统。本书共 5 章,其中第 1 章,主要介绍了本书的研究背景、研究现状以及主要研究内容等;第 2 章,针对多型号生产的特点,提出了基于二级协调的多型号生产调度运行模式,并建立了支持该模式的基于多 Agent 的多型号生产调度系统模型;第 3 章,研究基于 ECNP 的多型号协作规划方法,包括提出多型号协作规划的协调模型和协调过程模型、建立基于 ECNP 的协调机制、建立外协计划模型并优化外协计划生成;第 4 章,针对最小化工期问题和资源能力平衡问题,提出了基于混合遗传算法的多型号调度优化方法,以及基于遗传蚁群融合算法的多型号资源能力平衡方法;第 5 章,初步实现基于多 Agent 的多型号生产调度系统(MPPSS)。

本书是作者在多 Agent 系统与多项目调度优化方向近几年研究成果的总结,从开始构思到最终完稿,历经了多年的研究总结与反复凝练。本书算法与理论并重,来源于实践又

最终回归于实践,不仅为多 Agent 系统与多项目调度优化的结合提供了理论方向,同时还设计了相应的 MPPSS 系统,很大程度上优化了多型号生产调度的结果,提高了计划的一致性与计划调节的敏捷性。希望本书能为从事人工智能与项目调度领域的科研人员提供借鉴与参考。

感谢我的家人、同事和朋友,是他们的无私帮助和支持,使得本书能够顺利完成。

由于作者水平有限,书中难免有不妥和疏漏之处,请广大读者批评、指正。

著 者

2016 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 研究的目的和意义	4
1.3 国内外研究现状及分析	5
1.4 课题来源和本书的主要研究内容	19
第 2 章 基于多 Agent 的多型号生产调度系统模型	21
2.1 引言	21
2.2 适合多型号并存企业的生产调度运行模式	21
2.3 多型号环境下生产调度系统对多 Agent 系统的需求	23
2.4 基于多 Agent 的多型号生产调度系统建模	24
2.5 MPPSS 中 Agent 间的通信	31
2.6 本章小结	33
第 3 章 基于 ECNP 的多型号协作规划	35
3.1 引言	35
3.2 多型号协作规划及其过程	35
3.3 基于 ECNP 的协调机制	37
3.4 基于多 Agent 协调的多型号任务分配	39
3.5 外协计划的优化问题研究	48
3.6 本章小结	54
第 4 章 多型号调度优化	55
4.1 引言	55
4.2 多型号生产中的调度优化	56
4.3 资源受限多型号调度的最小化工期问题研究	57
4.4 多型号生产资源能力平衡问题研究	67
4.5 多型号调度优化算法的集成方案	78
4.6 本章小结	79
第 5 章 基于多 Agent 的多型号生产调度系统设计与开发	81
5.1 引言	81
5.2 某多型号产品制造厂的生产调度现状	81
5.3 MPPSS 系统的开发环境	82

5.4	MPPSS 系统的数据结构	83
5.5	MPPSS 系统的体系结构	84
5.6	MPPSS 系统实现	84
5.7	MPPSS 系统应用结果的分析与评价	93
5.8	本章小结	94
结论	95
参考文献	97

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出

自 20 世纪 70 年代以来,世界市场的特征由传统的相对稳定逐步演变成动态多变,由过去的局部竞争演变成全球范围内的竞争;同行业之间、跨行业之间的相互渗透、相互竞争日益激烈。为了提高竞争力,现代的制造企业必须解决 TQCS 难题,即以最快的上市速度 T(Time to Market)、最好的质量 Q(Quality)、最低的成本 C(Cost)、最优的服务 S(Service)来满足市场需求。与此同时,信息技术取得了迅速发展,特别是计算机技术、信息处理技术等取得了人们意想不到进步。20 世纪 80 年代初,先进制造技术以信息集成为核心的计算机集成制造系统开始得到实施;80 年代末,以过程集成为核心的并行工程技术进一步提高了制造水平;进入 90 年代,先进制造技术进一步向更高水平发展,出现了虚拟制造、精益生产、敏捷制造等新的概念和哲理。制造哲理是一种制造观念和生产策略,是一种改进整个生产过程、提高企业竞争力的战略技术手段。图 1-1 描述了各种制造哲理在活动空间和柔性范围方面的比较^[1]。

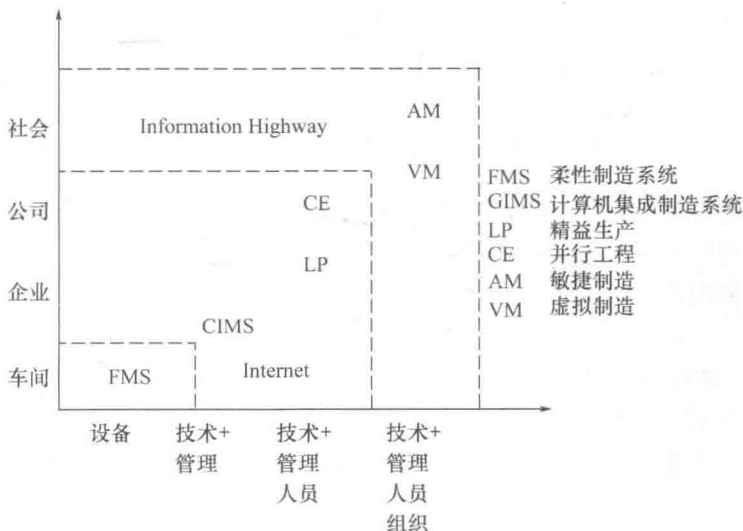


图 1-1 不同制造哲理的活动空间和柔性范围

任何先进的制造哲理及建立在其上的先进制造系统,只有通过先进的生产管理,才能在原材料流经制造系统并最终变为市场产品的过程中,取得最大的经济效益。由于市场需求不断变化,而企业的资源是有限的,因而资源使用者之间对有限资源的需求在时间和数量上存在冲突与矛盾。生产调度的目的就是合理分配有限的资源,解决冲突,达到所求目标最优。生产调度是连接产品设计与制造的关键环节,是制造系统的运筹技术、管理技术、优化技术发展的核心。有关资料表明,制造过程 95% 的时间消耗在非切削过程中^[2]。有效的调度方法与优化技术的研究和应用,已成为先进制造技术实践的基础和关键。20 世纪 60 年代以来,相继出现了物料需求计划 (Material Requirements Planning, MRP)、制造资源计划 (Manufacturing Resources Planning, MRP II) 和企业资源计划 (Enterprise Resource Planning, ERP) 等新的生产管理方式^[3,4,5]。图 1-2 给出了制造企业生产计划与控制的框架结构^[6]。

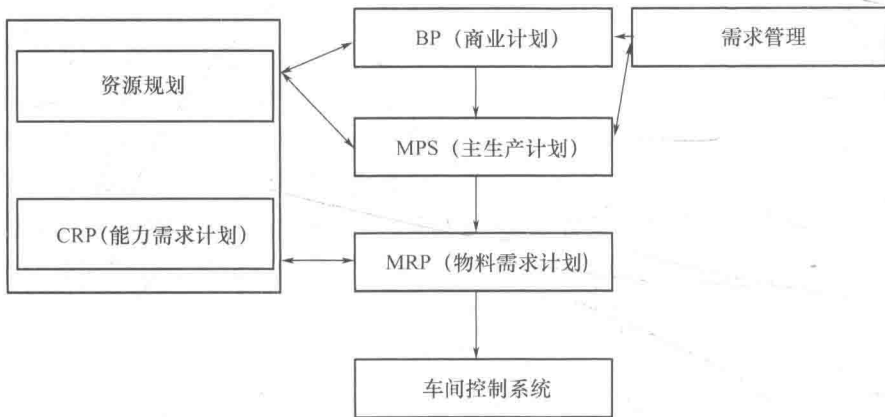


图 1-2 生产计划与控制的框架结构

我国为了增强国有大中型企业的竞争力,在 863 计划中制定了 CIMS 发展战略,并在大量的制造业中推广 CIMS 应用工程。由此作为 CIMS 核心的 ERP 软件得到了迅速发展,目前已形成了多种国产化的 ERP 软件系统,为我国批量生产类型的离散制造企业带来了巨大的经济效益。

然而,在众多的企业中大量地存在着多型号并存生产的企业,这些企业大多分布在国民经济的重要领域,如航空航天制造、军工制造、船舶制造、大型科研项目研制等。它们是国民经济的支柱产业,其发展状况对国民经济的影响举足轻重。目前对于多型号生产管理研究却不多见。

以卫星、导弹等航空航天型号产品生产为例,其生产过程具有多型号交叉并行生产,设计和制造周期长,产品各部件之间时序约束关系和成套性要求严格以及关键资源设备能力

不足的特点。目前存在的主要问题是各生产环节相互独立、信息集成化程度低、生产计划与控制手段落后,制造资源不能有效地整合与优化,不能平衡多型号间资源冲突,没有统一的可借鉴的生产管理模式,导致研制与生产周期长、质量不稳定、批产能力弱,严重制约了我国航空航天产品批生产能力的提高。多型号生产调度系统作为连接企业管理层和生产执行层的桥梁,是解决上述问题的关键。

多型号调度具有不同于传统集中式调度的特征,以往开发的传统集中式调度系统是一种缺少生产适应性的刚性系统,很难适应组织分散、决策分散的分布式多型号管理的要求,其不相适应性具体表现如表 1-1 所示。

表 1-1 传统生产调度模式同多型号生产调度思想的不相适应性

比较项目	传统的生产调度模式	多型号生产环境下的生产调度模式
组织模式	单个实体企业组织	多个型号管理相交叉的网状组织
组织特点	地理集中、成员稳定	地理分散、成员动态
计划模式	基于库存和生产的串行模式	并行的协作生产计划模式
决策模式	集中式决策	分布式的群体决策
信息反馈机制	平行的分层反馈机制	扁平的网络化反馈机制
竞争观念	“win - lost”式	“win - win”式

近年来,很多学者试图将分布式人工智能研究领域中的多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)理论用于解决制造系统的计划、协调与调度问题^[7]。MAS 具有良好的灵活性,非常适合处理数据、知识、控制分散的分布式问题。MAS 既强调分布式自主决策,又强调各个 Agent(智能体)之间共同协作解决问题的能力,这些特点正好适合与多型号计划调度框架在实际运行中所表现出来的分布性、异构性、协同性的特征。国内外学者多数都是将 Agent 用于车间计划调度控制的研究,进行基于 Agent 的车间生产过程调度系统的框架模型方面的研究^[8],在基于 Agent 的多项目调度方面研究较少^[9],而有关 MAS 与多型号生产调度运行模式相结合的研究还未见有成果发表。目前存在如下主要问题:

(1)生产调度运行模式是实现多型号产品快速研制生产的关键。多型号生产调度运行模式从单型号内部扩展到整个多型号企业,以便更有效地控制企业内部的计划,同时在产品研制中强调多型号管理和型号交叉并行调度,目前缺乏支持多型号生产的调度运行模式。

(2)调度运行模式框架转化成最终的详细调度模型是多型号生产调度系统设计的第二个演化阶段。各个型号都追求自己的最优目标,但各个局部最优目标并不能保证整体最

优。这就要求各型号根据共享的信息进行协商与合作。因此,引入 MAS 来模拟、优化、实现、控制多型号生产调度系统的运行,将有利于解决并行分布的多型号调度问题。目前缺少一个支持多型号调度运行模式框架的有效 MAS 模型,需要对 MAS 建模、MAS 控制结构、Agent 间的通信进行研究,以获得最终的理想调度模型。

(3) 型号研制生产过程中的大量不确定性和动态性因素导致多型号生产计划需要不断协调,所以计划的生成和执行时的控制都是不断协商的过程,难以实现一次性计划,对于面向多型号协作规划的协商模型、协商机制、任务的动态分配方法以及外部协作计划方法仍没有研究。

(4) 多型号生产的整体最优和在其约束下的型号内部最优都是调度优化问题,这类问题可描述为:如何安排给定多型号任务到有限资源上进行加工,在满足各个任务的时序约束和资源约束的前提下,优化目标函数。而目前研究较为成熟的是没有资源约束的机器调度(Machine Scheduling),机器调度(如 Job shop)是型号调度的特殊情况。多型号调度优化是一个 NP-hard 的问题,对其研究还很不成熟。

(5) 多型号生产企业中往往是多个型号生产并行进行,而且型号任务的到来又是随机的,每个型号任务的交货期及重要程度又各不相同,导致共享资源的冲突。因此,如何在满足所有型号交货期的前提下平衡有限的资源是一个很复杂也很关键的技术问题。

(6) 缺乏一个将多型号调度系统与其他遗留系统(ERP、CAPP 等)有效地集成起来的系统框架。

1.2 研究的目的是和意义

本书的主要目的是研究基于多 Agent 的多型号调度技术的理论与工具,以极大地缩短生产进程,提高生产效率。通过对基于多 Agent 的多型号生产调度系统建模、Agent 间协作、多型号调度优化和能力平衡等问题展开深入研究,必将促进多型号并存企业生产管理的发展。

本研究对于多型号产品的快速研制生产具有重要意义,主要体现在:

(1) 有利于推进多 Agent 技术在生产调度领域的应用。从研究的现状分析中可以看到,多 Agent 技术在生产调度领域的应用尚处于起步阶段。本研究通过结合多型号并存企业的实际情况,将多 Agent 技术用于解决多型号之间的协作生产,为多型号并存企业生产提供了有力的保障。

(2) 有利于完善生产调度理论体系。信息系统应用于生产调度系统,经历了从 MRP、MRP II 到 ERP 的过程,这些都是基于单个项目生产进行的,而多型号企业是以多型号共享有限资源为特点进行优化调度,因而单个项目生产的调度方法不再适应多型号企业生产实际的需要。并且对于多型号之间的协作生产过程中遇到的冲突问题,需要进一步的研究,

现有的调度系统软件更未涉及这些方面。

(3)有利于缩短多型号生产周期,提高生产效率。通过实施基于多 Agent 的多型号生产调度系统,可以快速制订优化的多型号生产计划,有效地指导企业的生产运作过程,使得多型号并存生产企业能够快速响应需求变化。

1.3 国内外研究现状及分析

1.3.1 制造企业生产控制模式研究现状

针对制造企业的产品性质、批量大小及专业化程度的不同,采用的生产组织形式和生产控制模式也有较大的差异。传统的生产控制模式主要是物料需求计划 MRP、准时生产 JIT、最优生产技术 OPT 和项目管理 PM 等,它们适合于不同的生产类型。

1. 物料需求计划 (Manufacturing Resource Planning, MRP)

适合于批量生产的离散型制造管理,其实质是计算物料的需求数量和需求时间;根据订单或预测的需求数量与产品结构计算每个零件的毛需求量;再根据毛需求量、独立需求量和库存状况计算物料的净需求数量;通过交货期和制造提前期计算需求时间。假定生产能力是无限的,计划在实际执行时可能因为能力有限而不可行,Nicholas A. J. Hastings 等^[3]为得到真实可行的生产计划,将生产调度和物料需求计划集成在一起,根据各时间段的能力状况,考虑可行生产计划和相关物料需求计划,克服了提前期 MRP 的不可行性,但仅适合单个企业的生产管理。实际生产的复杂性和不确定性也使得 MRP 存在一些难以解决的问题,如批量大小、提前期和库存水平等,目前有相当多的学者在进行这方面的研究:Herman A. J. Crauwels^[4]对基于 MRP 的短期计划制定问题做了研究;Hyun-loon Kim 等^[5]对 MRP I 环境下生产批量问题提出了多级能力优化模型及一个启发式算法,该模型假定提前期给定,每个时间段内需求为常数,用平均库存水平计算库存成本;Hegedus Michael G. 等^[10]在 MRP 环境下,将生产模型分为物料获取过程和生产过程两个阶段,通过总成本从理论上分析了提前期和报价交货期的关系,借助于供应链强调生产中的供应过程;Kingsman Brian G.^[11]根据生产过程中的不确定性,基于层次式工作负载积累的控制,采用输入/输出工作负载的控制方法管理提前期,该方法比预测提前期更好。MRP 是目前国内应用最广泛的生产管理模式,但由于该系统没有有限能力计划和信息的实时反馈功能,产生的计划不是很好用。总之,MRP 按照零件组织生产,不考虑工序之间的相互约束关系,对于多品种、中小批量、结构简单的生产较为有效。

2. 准时生产(Just In Time, JIT)

适合于流程式企业或者大批量生产的离散企业管理,是一种以看板管理(Kanban)为主要技术的一种牵引式(Pull)生产管理技术,其基本含义是根据最终产品的实际需求牵引部件生产,再根据部件生产的需求牵引零件生产,以保证零部件生产的同步和协调,达到库存最小^[12]。生产过程的组织 and 协调是通过看板(需求卡和生产卡)的发放和回收进行的。看板管理没有MRP II中相应的能力需求计划,生产过程必须经常调整,因此不适合产品多变,需求波动大的生产。对于生产平稳的大批量流水生产线,看板管理能够有效地提高系统生产率,降低库存^[13]。

MRP和JIT到底谁更优越一直备受关注, Gerhard Plenert^[14]阐述了二者的本质区别,着重分析MRP的优缺点,指出MRP并不失效也过时,其使用效果不好的原因是过分注重劳动力效率,影响了关键资源和物料的效率,应尽量缩短提前期、使用安全能力、消除安全库存; Samir Lamouri^[15]等提出准时MRP环境的两级主生产计划模型,但在实际使用中还不可靠; Ho. J. C.等^[16]分析了MRP/JIT与推式/拉式模式的关系,指出MRP和JIT系统有很多的相似特性,实际系统很少使用单纯的MRP或JIT生产系统,将二者结合更适用于现实制造环境。

3. 最优生产技术(Optimized Production Technology, OPT)

OPT是以色列物理学家戈德拉特(Dr. Eliyahu M. Goldratt)在研究晶体原子热运动的过程中发现的一种大变量离散过程优化的方法^[17],并把它用于生产管理。哲理强调“瓶颈”资源的最大程度利用,加工尽量连续不断,因此要求在“瓶颈”机床前形成零件队列,这就要求零件在“瓶颈”机床加工前的各道工序就尽早安排加工,使物流以最快的速度通过“瓶颈”,这是一个“挤”的过程。OPT的基本思想就是^[18]:面对要生产的产品,找出产品生产中影响生产进度的最薄弱环节,集中主要精力保证最薄弱环节满负荷工作,不至于影响生产进度,便可以使生产周期缩至最短,在制品库存降至最低。在企业的生产过程中,限制整个生产系统生产效率的最薄弱环节称为关键资源,关键资源可以是人、设备、物料等。在关键资源上加工的工序称为关键工序,含有关键工序的零部件称为关键零部件。OPT的基本原理可以归纳为^[19]:①尽最大努力,保证关键资源的满负荷工作;②由关键资源的能力决定非关键资源的利用率和生产效率;③对关键资源的前道工序和后续工序采用不同的计划方法,提高计划的可实施性。近年来,OPT被重命名、扩展和包装为约束理论(Theory of Constraints, TOC)^[20],它在项目时间管理方面就是关键链技术,TOC主要是体现了注重分清主次,找到瓶颈,集中精力解决主要矛盾,追求物流平衡,而非能力平衡等原则^[21,22]。Herman Steyn^[23]综述了该技术越来越广泛的应用,提出TOC除了应用于项目调度外,还可用于多个项目共享的资源管理。

毋庸置疑,OPT用于传统的生产方式确实能起到很好的功效,但面向多型号并存情况下的生产企业,为了取得总体的最大效益,需要在各个型号之间协调有限资源、分配富裕时间等。这仅仅依靠最优化生产技术,会显得力不从心。

4. 项目管理 (Project Management, PM)

项目管理适合于航空航天项目、其他的国防项目、建筑工程和大型科研项目的生产管理^[24,25,26]。近代项目管理起源于20世纪50年代,在美国出现了CPM^[27]和PERT^[28]技术,20世纪60年代在阿波罗登月计划中取得巨大成功,由此揭开了项目管理研究和实践的高潮。网络计划是项目管理中的主要方法^[29],网络图可清楚地反映出各项活动之间的相互约束、相互协调的逻辑关系,通过计算网络时间参数可求得关键路径,从而合理地分配资源,把资源分配给关键活动或时差较小的活动,达到时间和资源的平衡。首先要通过网络图表示活动间的相互关系,网络图实质上就是一个有向图,通常有两种表示法:AON(Activity-on-Node)和AOE(Activity-on-Arc)^[30]。有 n 个活动的网络图用AON表示法时,通常用虚活动0表示整个网络图的开始、虚活动 $n+1$ 表示整个网络图的结束,它们的加工时间都设为0,网络图的每个节点表示一个活动,活动间的约束关系用边表示。 $i \rightarrow j$ 表示活动 i 约束活动 j ,即活动 i 完成后活动 j 才能开始, $\text{pred}(j)$ 为 j 的所有直接前趋活动集合, $\text{succ}(j)$ 为 j 的所有直接后继活动集合, p_j 为 j 的加工时间;L. Valadares Tavares等开发了网络图自动绘制软件,并对传统PERT(Program Evaluation and Review Technique)方法给出总加工周期的概率分布,提出了与网络图结构相关的指标集,分析了指标集和总加工周期的关系。

从网络图生成网络计划的典型方法是关键路径法CPM(Critical Path Method)和计划评审法PERT,如果活动的加工时间是确定的则采用CPM,如果活动的加工时间是不确定的则采用PERT。这两种方法及其派生的与网络图相关的研究主要有:

(1) CPM研究,其中G. Singh^[31]等分析了解决广义最大延迟问题的Brucker - Garey - Johnson算法的最差性能,给出了相应上界。

(2) PERT研究,这方面研究主要集中在加工时间的不确定性用模糊数和概率来表示的PERT法,Shyi - Ming Chen等^[32]针对以前模糊PERT方法可能找不到关键路径的问题,提出一个在模糊网络图中可找到多个关键路径的模糊PERT算法;Eugene Levner等^[33]对PERT网的参数化关键路径问题做了研究并应用于一个无向图调度问题。

(3) 网络图的分解,对于非常复杂的网络图,需要通过并行算法来寻找最短路径,Andreas Jakoby等^[34]研究了广播系统的复杂性,给出了一个网络图分解算法;H. Edwin Romeijn等^[35]研究了大规模有向网所有节点对应的最短路径并行计算问题,提出一个层次式分解算法,比传统的Dijkstra算法有更低的复杂度。

(4) 其他计划生成方法,Sevkinaz G.等^[36]提出一个用原始对偶关系的线性规划模型来解决生产计划与控制问题,该方法对中等规模问题在计算方面优于传统的PERT - CPM等

方法;Jonathan Jingshen Shi 等^[37]对建筑计划与调度问题提出基于资源的面向对象的计划方法以满足不同计划阶段的需求。

(5)项目调度,针对不同的目标,如时间-成本权衡^[38]、时间-资源权衡^[39]等提出不同的算法,该类问题是目前研究的一个热点。

其他的生产管理技术还包括有限能力调度系统,如瓶颈分配方法(Bottleneck Allocation Methodology, BAM)^[40]和基于调度的制造(Schedule Based Manufacturing, SBM)。

前面介绍的几种生产管理模式各有优点,但都是基于单项目产品内部计划与控制问题,没有考虑多型号并行生产类型,目前缺乏支持多型号并行的生产控制模式。

1.3.2 MAS 技术在生产调度领域应用的研究现状

多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)是一种从问题的局部概念模型出发,通过由底向上的方式形成的一种分布式人工智能系统,它研究的是一组在逻辑上或物理上分离的智能体之间行为的协调,各个智能体具有一定的独立解决问题能力,它们通过彼此之间的协商共同完成比较复杂的任务。MAS既可以处理单一目标的问题,也能处理多目标问题。由于其在问题求解方面的潜力,MAS很适合于复杂生产调度与制造系统优化问题的研究。我们把应用了MAS技术的调度系统称作多智能体调度系统(Multi-Agent Scheduling System, MASS)^[41]。

MAS技术大约从20世纪80年代开始逐步向调度研究领域渗透,90年代后呈现出迅速增长的趋势。相对于传统的调度方法和系统,MASS主要有这样几个方面的特点^[42]:

(1)用自主模块构成的分布式结构代替了传统的集中式非自主性结构。

(2)实际的调度执行主要通过多个代理协商来完成,而不是完全的预先计划,因此具有更强的实时性,特别适合于动态调度。

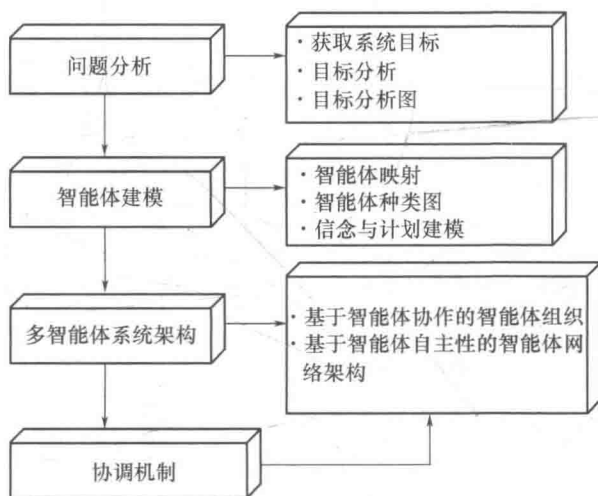
(3)在一个环境中针对某个问题,使用多个办法来代替传统的单一办法。

(4)更多地用并行计算代替串行计算。在这些共性的基础上,我们不妨用系统的观点,从MASS的要素构成(MAS系统建模)、要素之间的关系(Agent间协调机制)和系统的体系结构等方面(如图1-3所示^[43])对相关的研究成果进行评述。

1. MAS系统的建模

研究和建立基于MAS的制造系统,首先要将对象系统Agent化,即将实际制造系统分解成若干组件,并对这些组件进行Agent化包装,建立面向Agent的系统模型,从而将制造系统映射成一个MAS^[44]。根据映射对象的不同,现有的方法可大致分成两类:基于功能的建模方法和基于物理的建模方法^[45]。

在基于功能的建模方法中,Agent用来封装系统中的功能模块,如设立任务规划Agent、

图 1-3 MAS 的研究领域^[43]

调度 Agent、控制 Agent、加工 Agent 等。这里,在 Agent 与物理实体之间没有直接的联系。例如,在文献[46]建立的系统中,不同 Agent 具有不同的功能,如路径规划、通信等。其他例子还有 IFCF^[47]、CNPLEX^[48]等。

在基于物理的建模方法中,Agent 对制造系统中的物理实体进行封装,例如工人、机器、工具、夹具、产品、工件、特性和操作等。此时,在 Agent 与物理实体之间有着明显的联系。Huang C. Y. 等在文献[49]中,分别对制造单元、机器、工件等物理实体进行 Agent 化包装。Agent 像以往的控制单元一样,具有多种局部控制能力。例如,与机器结合的 Agent 负责为机器争取制造任务并支持任务的按时完成;与工件结合的 Agent 负责为工件获得必要的生产所需资源。系统中 Agent 间没有从属关系,依靠局部信息和目标自主决策。McDonnell 应用类似的方法,将一个车间的过程规划和控制问题构造成一个多 Agent 系统,其中包括三类 Agent:工件 Agent、资源 Agent、信息 Agent^[50]。

2. MAS 的体系结构

MAS 本身主要有三类结构:功能结构、黑板结构和分布自治式结构。Agent 映射的对象不同,会导致系统总体结构上的很大差异。由于递阶结构在制造领域中广为采用,所以有些制造领域的 MAS 应用研究采用了递阶结构。目前,随着研究的深入,人们又提出了混合结构的 MAS。图 1-4 描述了 MAS 系统结构的进化情况。

(1) 功能结构

功能结构是 MAS 发展初期所采取的结构。在功能结构中,每个 Agent 代表系统的一个

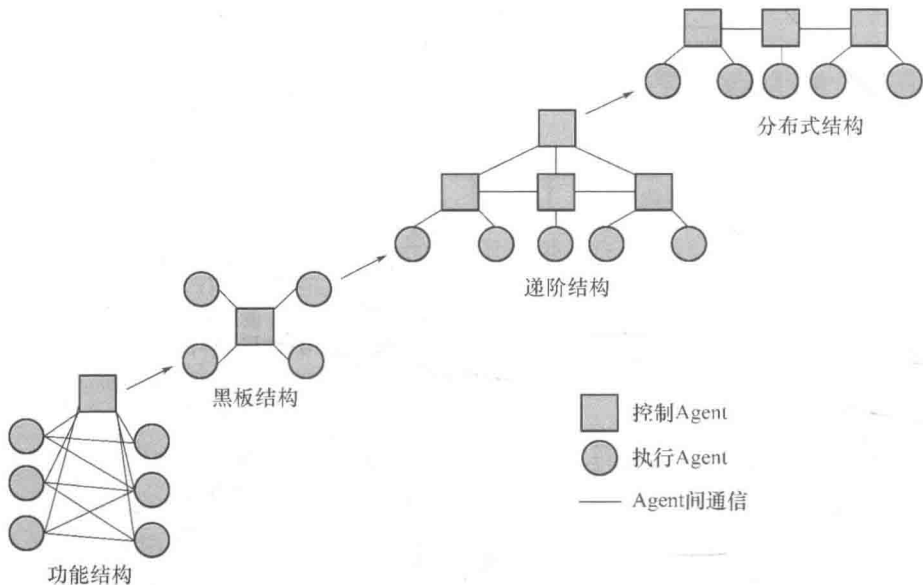


图 1-4 MAS 的体系结构进化论

功能组件,通常一种功能需要一个 Agent。这些功能体互相之间直接通信,通信时有些采取对等(peer-to-peer)方式,但更多的是主/仆(master/slave)方式,即一个功能体调用另一个功能体。像 Berker 和 Brown 提出的单功能的基于 Agent 的设计系统^[51]、Balasubramanian 和 Norrie 研究的多 Agent 智能设计系统集成制造和车间控制方法^[52]等均采用了这种 MAS 结构。当系统中的 Agent 数量很大时,在功能型的系统结构中,当一个 Agent 与很多 Agent 发生关系,Agent 间的频繁通信,会显著增加系统的负担,增加系统的复杂性。

(2) 黑板结构

在黑板结构中,每个 Agent 都是一个领域的专家,他们通过在一个中央黑板上发表关于同一个问题的部分解法来共享各自的专长。如果 Agent 不去修改的话,黑板上的通信信息将长期保存,因此,黑板作为全局信息的存储器,提供了通信的永久渠道。基于黑板结构的 MAS 例子可以参见 Smith 的 OPIS 系统^[53]和 Boeing 的基于黑板的车间控制系统^[54]等。

(3) 递阶结构

在递阶结构中,Agent 之间存在多层的主仆关系。递阶控制结构把集中控制结构中主控单元的功能分解为多个层次,将复杂的问题分解成若干简单的小问题,分布在多个控制层上。其控制结构呈树状分布,各层之间的关系为主仆关系。递阶结构的主要优点是具有鲁棒性,曾普遍应用于柔性制造系统的控制。它的主要缺点是各层之间严格的主仆关系和固定的控制模式,因此限制了系统的灵活性和对扰动的快速反应。首次实现的基于 Agent