



国家科学技术学术著作出版基金资助
先进生产规划与调度理论研究丛书
"十二五"国家重点图书出版规划项目

丛书总主编 李培根

作业车间调度 理论与算法

Zuoye Chejian Diaodu Lilun Yu Suanfa

张超勇 邵新宇 著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

014039165

F406.2
31

作业车间调度 理论与算法

Zuoye Chejian Diaodu Lilun Yu Suanfa

张超勇 邵新宇 著



北航

C1726599



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

F406.2

31

内 容 简 介

本书比较全面地综述了调度问题的国内外研究现状和发展,阐述了调度问题基本的概念、分类、特性和理论;介绍了基于元启发式算法的传统单目标单件/柔性作业车间调度优化算法;论述了根据问题解空间结构等特征设计的基于自然机理的新型混合优化算法,并通过对基准问题的测试证实了所介绍调度优化算法的有效性。针对现代离散制造企业需要,论述了复杂制造系统中广泛存在的多工艺、多目标、不确定和动态的作业车间调度优化的解决方法。

本书可供从事机械制造、工业工程、企业管理等专业的研究人员和工程技术人员阅读,亦可作为上述专业学生的研究、学习用教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

作业车间调度理论与算法/张超勇,邵新宇著. —武汉:华中科技大学出版社,2013.5
ISBN 978-7-5609-8972-3

I. ①作… II. ①张… ②邵… III. ①企业管理-生产作业-车间调度-研究 IV. ①F273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 102735 号

作业车间调度理论与算法

张超勇 邵新宇 著

策划编辑:王连弟

责任编辑:姚同梅

封面设计:范翠璇

责任校对:封力煊

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:18.5

字 数:400千字

版 次:2014年3月第1版第1次印刷

定 价:88.00元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



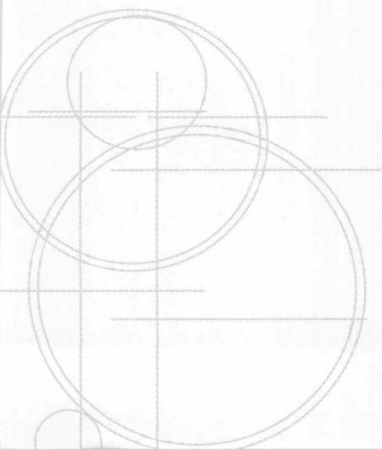
国家科学技术学术著作出版基金资助



"十二五"国家重点图书出版规划项目

先进生产规划与调度理论研究丛书

丛书总主编 李培根



前 言

调度优化是先进制造技术实践的基础和关键。采用高效的优化调度技术,有助于对客户紧急订单及生产中突发事件等做出迅速、科学的反应,改善企业的生产性能指标,例如提高设备利用率、提高准时交单率、降低库存及成本等,从而确保实现企业的经济目标和提高企业的市场竞争力。随着全球市场竞争的加剧、客户需求的多样化和个性化,离散制造系统的调度问题愈来愈受到重视。

在离散制造系统中,调度问题种类繁多、方法多样,其中作业车间调度问题是最基本、最著名的调度问题,也是 NP(non-deterministic polynomial,即非确定性多项式)-hard 问题,不可能找到精确求得最优解的多项式时间算法。研究者们为解决这个难题已付出几十年的努力,但至今运用最先进的算法仍很难得到规模较小问题的最优解。近十几年以来,人们通过模拟自然界中生物、物理过程运行规律而发展的超启发算法,如遗传算法、粒子群优化算法、蚁群优化算法、禁忌搜索算法、模拟退火算法、DNA 算法等,在解决复杂制造系统的调度问题中受到越来越普遍的关注。这些基于自然规律的算法在很大程度上克服了传统算法如动态规划、分枝定界方法等缺乏可量测性的不足,为解决调度问题提供了新的思路 and 手段。

为了理论研究的需要,传统单件作业车间调度问题在实际调度问题的基础上做了较多的简化。不过它的典型性、复杂性以及所包括的调度问题的核心特性(工艺约束和机器约束),使其具有很强的推广性。例如:流水车间调度问题是单件作业车间调度问题的一类特殊情形,它的每个工件都有相同的工艺路线;柔性作业车间调度问题是单件作业车间调度问题的扩展,它允许各工序在给定的几台机器上完成。即使是更为复杂的柔性制造系统调度问题,虽然有物料储运、刀具和夹具管理、加工检测等众多因素的介入,但就其核心部分而言,单件作业车间调度问题研究中所形成的许多技术依然可以借用。因此,选择这一类型的问题为基础开展深入研究,具有广泛的针对性和较高的实用价值。

传统单件作业车间调度问题理论上虽取得了重大进展,然而实际制造系统的车间调度问题不仅模型上要比经典问题更为复杂多样,而且具有计算复杂性、多目标性、不确定性和动态性等特点。具体表现如下:

(1) 计算复杂性 柔性作业车间调度问题是传统单件作业车间调度问题的扩展,它不仅需要确定工序加工的顺序,还要给每个工序分配机器,是比单件作业车间调度问题更为复杂的 NP-hard 问题。

(2) 多目标性 实际生产中经常考虑多项性能指标要求,且各项要求可能彼此冲突。常用的调度性能指标包括最大完工时间最小、交货期最小、设备利用率最高、



成本最低等等。

(3) 不确定性 实际制造受到广泛的随机和不确定的因素,如机器故障、操作人员的熟练程度、原材料的差异、刀具磨损等因素的影响,确定的加工信息很少能获得。

(4) 动态性 实际生产制造是一个动态过程,工件依次进入待加工状态,各种工件不断进入系统接受加工,完成加工的工件又不断离开。

本书反映了作者及其研究团队的研究成果,阐述了调度问题基本模型和理论,介绍了用于求解单件/柔性作业车间调度问题的基于自然规律的元启发式算法的理论及计算方法,以及作者在计算复杂性方面取得的突破性成果;针对实际离散制造企业作业车间调度的需要,论述了实际复杂制造系统中广泛存在的多工艺、多目标、不确定和动态的柔性作业车间调度优化的解决方法。

本书由张超勇、邵新宇著。邵新宇负责全书的结构规划和统筹工作,并撰写前言和第1章;张超勇撰写其他章节,内容主要来源于他的博士论文,以及他所指导的硕士研究生的研究成果。这些硕士研究生主要包括连坤雷、刘捷和徐绍铤。他们中有些已经走上工作岗位,或者在高等院校继续从事科研、教学工作,或者任职于制造企业,在此对他们表示感谢。

特别感谢国家科技部“863”计划、国家自然科学基金委员会的大力支持,没有国家“863”计划课题(编号 2007AA04Z107)、国家自然科学基金重点项目(编号 51035001)和国家自然科学基金项目(编号 51275190,50875190,51105289)的资助,本书的研究成果就难以取得。

作为研究成果,书中不可避免地会存在不完善之处,内容的表述也会存在不妥当的地方,作者衷心希望各位专家和广大读者不吝批评和指正。

作者

2012年12月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 车间调度的重要性	(1)
1.2 调度问题及其国内外研究概况	(4)
1.2.1 调度问题的描述及其分类	(4)
1.2.2 调度问题的特性	(5)
1.2.3 调度问题的研究概况	(7)
1.3 调度问题的研究方法	(7)
1.3.1 精确方法	(9)
1.3.2 近似方法	(10)
1.4 元启发式算法及其在车间调度中的应用	(13)
1.4.1 基于群体智能的算法	(13)
1.4.2 局部搜索算法	(15)
1.5 基于元启发式算法的调度方法研究与前景展望	(18)
主要参考文献	(19)
第 2 章 基于遗传算法的 Job-Shop 调度问题研究	(33)
2.1 基本遗传算法介绍	(33)
2.2 Job-Shop 调度问题的描述	(34)
2.2.1 Job-Shop 调度问题模型	(35)
2.2.2 调度类型分类	(36)
2.3 用遗传算法求解 Job-Shop 调度问题	(38)
2.3.1 编码和解码	(38)
2.3.2 交叉操作	(42)
2.3.3 变异操作	(43)
2.3.4 选择操作	(44)
2.3.5 适应度函数	(44)
2.3.6 遗传算法求解步骤	(45)
2.3.7 计算试验结果	(45)
2.4 用遗传算法求解非传统 Job-Shop 调度问题	(47)
2.4.1 非传统 Job-Shop 调度问题的编码和解码	(48)
2.4.2 非传统 Job-Shop 调度问题的性能指标函数	(49)
2.4.3 计算结果与分析	(50)



2.5 本章小结	(53)
主要参考文献	(54)
第3章 基于禁忌搜索算法的 Job-Shop 调度问题研究	(58)
3.1 禁忌搜索算法基本理论	(58)
3.1.1 禁忌搜索算法原理	(58)
3.1.2 禁忌搜索算法设计要素	(58)
3.2 Job-Shop 调度问题的析取图模型	(62)
3.3 用禁忌搜索算法求解 Job-Shop 调度问题	(64)
3.4 计算试验研究与结果	(71)
3.5 本章小结	(77)
主要参考文献	(77)
第4章 基于混合算法的 Job-Shop 调度问题研究	(81)
4.1 引言	(81)
4.2 用 TSSA 混合算法求解 Job-Shop 调度问题	(82)
4.2.1 TSSA 混合算法的优化策略	(83)
4.2.2 用 TSSA 混合算法求解 Job-Shop 调度问题	(85)
4.2.3 试验结果与分析	(87)
4.3 用 GATS 混合算法求解 Job-Shop 调度问题	(95)
4.3.1 GATS 混合算法的优化策略	(95)
4.3.2 用 GATS 混合算法求解 Job-Shop 调度问题	(96)
4.3.3 试验结果与分析	(101)
4.4 本章小结	(108)
主要参考文献	(108)
第5章 基于混合算法的柔性作业车间调度问题研究	(112)
5.1 柔性作业车间调度问题描述	(112)
5.2 基于遗传算法的柔性作业车间调度问题研究	(114)
5.3 基于遗传禁忌搜索算法的柔性作业车间调度问题研究	(123)
5.3.1 柔性作业车间调度析取图模型	(123)
5.3.2 基于禁忌搜索算法的柔性作业车间调度优化	(125)
5.3.3 用 GATS 算法求解柔性作业车间调度问题	(127)
5.3.4 计算试验结果与分析	(127)
5.4 本章小结	(129)
主要参考文献	(129)
第6章 工艺路线规划与车间调度集成优化研究	(131)
6.1 引言	(131)
6.2 工艺路线规划与车间调度集成研究现状	(131)

6.3	用改进遗传算法求解工艺路线规划与车间调度集成问题	(133)
6.3.1	工艺路线规划与车间调度集成描述	(133)
6.3.2	基于改进遗传算法的多工艺路线调度优化	(135)
6.3.3	测试与结果分析	(139)
6.4	用改进遗传算法求解多工艺路线批量调度问题	(144)
6.4.1	问题描述	(145)
6.4.2	用改进遗传算法求解多工艺批量调度问题	(148)
6.4.3	测试与结果分析	(150)
6.5	本章小结	(152)
	主要参考文献	(152)
第 7 章	用遗传算法求解多目标动态调度问题研究	(157)
7.1	引言	(157)
7.2	多目标优化问题的基本理论	(158)
7.2.1	多目标优化的基本概念	(158)
7.2.2	多目标优化算法	(160)
7.3	多目标柔性作业车间调度问题	(163)
7.3.1	问题描述	(163)
7.3.2	目标函数	(164)
7.4	基于改进 NSGA-II 算法的多目标柔性作业车间调度问题研究	(165)
7.5	基于滚动窗口的多目标动态调度优化研究	(178)
7.5.1	多目标动态调度问题研究现状	(178)
7.5.2	多目标动态调度问题描述	(179)
7.5.3	基于多目标遗传算法的动态调度优化	(182)
7.6	本章小结	(190)
	主要参考文献	(190)
第 8 章	不确定条件下多目标柔性作业车间调度问题研究	(193)
8.1	引言	(193)
8.2	不确定条件下的柔性作业车间调度问题基本理论	(193)
8.2.1	模糊集合与模糊数选取	(194)
8.2.2	模糊数操作	(196)
8.3	不确定条件下的柔性作业车间调度问题描述	(199)
8.3.1	不确定条件下的柔性作业车间调度问题	(199)
8.3.2	不确定条件下的柔性作业车间调度问题评价指标	(201)
8.3.3	若干种满意度可能情况的讨论	(202)
8.4	不确定条件下基于遗传算法的柔性作业车间调度问题研究	(203)
8.4.1	用遗传算法求解不确定条件下的柔性作业车间调度问题	(203)



8.5 不确定条件下的多目标柔性作业车间调度问题	(212)
8.5.1 不确定条件下的多目标柔性作业车间调度问题优化模型 ..	(213)
8.5.2 用改进 NSGA-II 算法求解不确定条件下的多目标柔性 作业车间调度问题	(213)
8.6 本章小结	(221)
主要参考文献	(221)
第9章 原型系统设计与开发	(223)
9.1 应用背景分析	(223)
9.2 原型系统功能	(224)
9.2.1 车间制造资源建模	(224)
9.2.2 车间作业计划与控制	(226)
9.2.3 生产过程仿真与监控	(229)
9.3 车间作业调度应用实例	(230)
附录 A Job-Shop 调度问题基准实例测试结果	(237)
附录 B 改进当前最好解的统计	(243)
附录 C 获得的最好解在国外网站作为最新成果公布	(245)
附录 D 部分基准实例新的最好解	(246)

第 1 章 绪 论

1.1 车间调度的重要性

调度问题是在实际工作中广泛存在的运筹学问题,通常定义为“把有限的资源在时间上分配给若干个任务,以满足或优化一个或多个目标”。调度不只是排序,它还包括根据得到的排序确定各个任务的开始时间和结束时间^[1]。这类问题的应用如此之广,人们对其所产生的兴趣如此之浓厚,以至于在生产作业计划、企业管理、交通运输、航空航天、医疗卫生和网络通信等领域,以及工程科学的几乎所有分支领域内,大量新的研究文献不断涌现^[2,3]。

在制造领域,调度是实现制造业生产高效率、高柔性和高可靠性的关键。有关资料表明,制造过程中 95% 的时间消耗在非切削过程中,制造过程中的调度技术直接影响着制造的成本和效益。采用高效的优化调度技术不仅有助于对客户紧急订单及生产突发事件等做出迅速和科学的反应,而且可显著改善企业的生产性能指标,例如提高设备利用率、提高准时交单率、降低库存及成本等,从而保证企业达到经济目标。随着全球市场竞争的加剧、客户需求越来越多样化和个性化,企业生产正在朝着“品种多样、批量变小、注重交期、减少库存”的方向发展,制造系统的调度问题受到日益广泛的重视^[4]。

我国花费数十亿美元引进和开发了制造资源计划(MRP II)、企业资源规划(ERP)等软件,但绝大多数没有得到应用或者发挥功效,其主要原因之一是“生产作业计划”这个技术瓶颈没有得到突破。这是因为 ERP 等以生产为核心,而企业制订生产计划的过程一般分为两个阶段:首先根据订单或市场预测生成“主生产计划”,然后根据主生产计划产生“生产作业计划”。将一个主生产计划的生产要求自动分解为复杂、具体的生产作业过程,是 ERP 系统最关键的一个环节,是 ERP 系统的核心功能。但是,对一些实施 ERP 管理的企业进行考察就会发现,车间里或者生产线上的生产作业计划及生产过程的调度管理仍然使用最初级、最原始的那种经验加手工方式,结果 ERP 系统与企业最关键的运转过程之间发生了断层,从这个断层衍生出来的大量问题成为 ERP 管理难解之死结。为什么众多著名的 ERP 软件公司都无法提供这种基本的“生产作业计划”功能?这就要从生产调度的基本职能说起。

生产调度是指针对一项可分解的工作(如产品制造),在尽可能满足约束条件(如工艺路线、资源情况、交货期)的前提下,通过下达生产指令,安排其组成部分(操作)所使用的资源、加工时间及加工的先后顺序,以获得产品制造时间或成本等的最优



化^[5,6]。一个生产过程可能有无穷多种“可行”的安排方式,但 ERP 的生产调度系统必须从其中找出一个“最优”的计划,即使不能达到最优,起码也要比手工计划更优,这样的软件才能真正发挥 ERP 的效能。但是这就凸现了一个关键技术问题:不仅要处理错综复杂的约束条件,还要从无穷多种满足约束的可行方案中找到优化的“生产作业计划”。如何才能找到这种优化的计划?这是 ERP 等系统共同面对的真正瓶颈问题,也是世界性的技术难题。

针对 MRP II/ERP 等在生产执行管理方面的限制和不足,制造执行系统(manufacturing execution system, MES)在 20 世纪 90 年代初被提出来,并越来越受到广大企业的重视。MES 位于企业的车间执行层,它强调制造计划的执行,在上层 MRP II/ERP 和底层设备控制系统(device control system, DCS)之间架起了一座桥梁。调度是 MES 的核心功能,优化、合理的作业调度是 MES 在制造业成功应用的关键。目前许多企业把 MRP II/ERP 与 MES 结合,或者直接与先进生产排程(APS)融合,以弥补 ERP 等在生产计划调度方面的不足。对此国外的专家学者已经付出了很多年的努力,其研究成果已形成了多个“MES 生产作业计划”和“APS 先进生产排程”产品,发展出了几十种先进生产调度算法。尽管如此,迄今所取得的成果依然未能彻底解决实际应用中所面临的包括求解速度和求解质量在内的各种问题。

把先进生产调度系统运用到 MES 或传统 MRP II/ERP 中,能给制造业带来如下关键的变化:

- (1) 最大限度发挥当前资源能力,提高企业生产能力。
- (2) 优化调度的结果给出了精确的物料使用和产出的时间、品种、数量等信息,应用这些信息可以把相关企业或者分厂、车间联合在一起组成一个“供应链(SCM)”系统,最大限度减少每个企业的库存量。
- (3) 优化生产调度计划可以用来作为生产决策的依据,并可对客户订单及生产突发事件做出迅速、科学的反应。
- (4) 根据自动生成的作业计划,可以自动生成质检、成本、库存、采购、设备维护、销售、运输等计划,带动企业各个不同管理模块围绕生产运转,改进这些模块的运转方式,可大大提高这些模块的运转效率,从而提升企业整体管理水平^[7]。

调度的应用如此广泛,地位如此突出,但同时却又性质极其复杂,解决十分困难。业已证明,绝大多数的调度问题是 NP-hard 问题,不可能找到精确求得最优解的多项式时间算法^[8]。有鉴于此,人们将研究目标转向各种近似方法。近十几年来,在众多的研究与探索中,通过模拟自然界中生物、物理过程和人类行为过程中所表现出的某些特点而发展的元启发式(meta-heuristics)算法,如遗传算法(genetic algorithms, GA)^[9,10]、禁忌搜索(tabu search, TS)算法^[11,12]、模拟退火(simulated annealing, SA)算法^[13,14]、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法^[15,16]、蚁群优化(ant colony optimization, ACO)算法^[17]、基因(DA)算法^[18]等,在包括调度问题在内的组合优化问题求解领域,受到越来越普遍的关注^[19-21]。这些算法在很大程度上克服了

传统解析算法的不足,为解决调度问题提供了新的思路 and 手段^[22-24]。进一步深入开展对这类技术的研究,使其更好地应用于求解调度问题,无疑会对调度技术及其他带约束的组合优化问题的发展产生积极的影响。

在制造业中,生产调度问题种类繁多、方法多样,其中单件作业车间调度问题(job-shop scheduling problem)是最基本、最重要的调度问题简称 Job-Shop 调度问题。本书以 Job-Shop 调度问题为研究重点,在该研究的基础上,将调度的领域适当地拓展和延伸,对实际中广泛存在的几类调度问题进行应用研究。在众多调度类型中,选择 Job-Shop 调度问题为主攻对象,主要出于以下几点考虑:

(1) 典型性 Job-Shop 调度问题是最基本的调度问题,同时也是最困难的 NP(非确定性多项式)-Complete 组合优化问题之一^[25]。Job-Shop 调度问题是实际生产调度问题的简化,然而它抓住了生产调度的关键,包括加工一般任务所要求的主要的工艺约束和机器约束^[26]。针对这一领域开展应用研究,在技术上具有较好的代表性。

(2) 复杂性 人们为解决这一难题已经付出几十年的努力,但运用目前最先进的算法仍很难得到较小规模问题的最优解。但因其解的最优性,这一难题至今仍激励着学者们不断探索。

(3) 可行性 Job-Shop 调度问题是生产调度领域中研究较早较多,发展较为成熟的一个分支,有丰富的运筹学研究基础;国内外学者已做了大量研究工作,进行了广泛的学术交流,不仅有一定的资料来源,而且还可以提供大量的测试基准,便于开展对比研究^[28]。所有这些均为顺利开展在这一领域的应用研究创造了良好的条件。

(4) 实用性 单件作业是现实应用中,尤其是在中小型生产企业中较为常见的生产类型(将加工中心视为一台机器),对解决实际问题有一定的针对性。同时,Job-Shop 调度问题也是研究其他类型调度问题的基础,具有较强的可推广性。

事实上,流水作业车间调度问题(flow-shop scheduling problem, FSP)是 Job-Shop 调度问题的一类特殊情形,其中每个工件都有相同的工艺路线;柔性作业车间调度问题(flexible job-shop scheduling problem, FJSP)是 Job-Shop 调度问题的扩展,它允许每个工序在给定的几台机器上加工。对于更为复杂的柔性作业制造系统(FMS)调度,虽然由于物料储运、刀具和夹具管理、加工检测和故障修复等众多因素的介入,问题的复杂程度远远超出一般调度问题,但就其核心部分而言,Job-Shop 调度问题研究中所形成的许多技术依然可以借用^[29]。甚至在生产领域以外的其他应用领域,如计算机与通信技术领域,也常常可以借鉴 Job-Shop 调度问题研究所取得的成果。因此,选择这一类型的问题开展深入研究具有广泛的针对性和较高的实用价值^[3]。

从理论上讲,车间调度技术的成功应用与发展不仅有赖于基于自然规律的各种启发式算法技术的完善与发展,同时有赖于对调度领域知识的深刻认识与研究,有赖于充分发掘和利用运筹学研究所取得的理论成果,使领域知识在问题求解过程中发



挥越来越多的作用,由此将算法和问题先验领域知识有机地结合,以实现全局寻优。因此,从理论上对调度问题进行研究,对于发展优化技术和解决包括调度问题在内复杂的组合优化问题具有重大的意义。

在实际生产环境中,调度问题存在动态性、随机性、约束性以及多目标等特性。生产过程的随机性、不确定性往往要求不断进行重新调度,这需要处理各种突发事件来适应各种复杂多变的动态加工环境。此外,现实应用中越来越多地遇到更加复杂的调度问题。因此,将 Job-Shop 调度问题的研究延伸到更具实际意义的动态调度和更具实际特性的问题中,不仅能丰富调度的理论研究和缩小理论问题与实际问题的差距,而且会产生巨大的经济效益。

1.2 调度问题及其国内外研究概况

对生产调度问题的研究源于 20 世纪 50 年代,该研究的实用性和重要性,使其在运筹学、工业工程等学科中形成一个独立的分支。调度问题的核心是模型与算法,前者涉及问题建模、目标函数和调度规则,后者则包括问题可解性、计算复杂性和有效算法等^[4]。

1.2.1 调度问题的描述及其分类

车间调度问题一般可以描述如下:

n 个工件在 m 台机器上加工。一个工件分为 k 道工序,每道工序可以在若干台机器上加工,并且必须按一些可行的工艺次序进行加工;每台机器可以加工工件的若干工序,并且不同的机器上加工的工序集可以不同。调度的目标是将工件合理地安排到各机器上,并合理地安排工件的加工次序和加工开始时间,使约束条件被满足,同时优化一些性能指标。

在实际制造系统中,还要考虑刀具、托盘和物料搬运系统的调度问题。

一般制造系统调度问题采用“ $n/m/A/B$ ”的简明表示来描述调度问题的类型^[4,30],其中 n 为工件类数, m 为机器数, A 表示工件流经机器形态类型, B 表示性能指标类型。常见的工件流经机器形态类型有:

J——单件作业车间(job-shop)调度问题;

F——流水作业车间(flow-shop)调度问题;

F,perm——置换流水线(permutation flow-shop)调度问题;

O——开放式(open-shop)调度问题;

K-parallel—— K 个机器并行加工调度问题。

性能指标 B (以符号表示)形式多种多样,大体可分为以下几类:

(1) 基于加工完成时间的性能指标,如最大完工时间 $C_{\max}$ 、平均完工时间 $\bar{C}$ 、平均流经时间 $\bar{F}$ 、最大流经时间 $F_{\max}$ 等。

(2) 基于交货期的性能指标,如平均推迟完成时间 $\bar{L}$ 、最大推迟完成时间 $L_{\max}$ 、最大拖后时间 $T_{\max}$ 、总拖后完成时间 $\sum_{i=1}^n T_i$,拖后工件个数 n_T 等。

(3) 基于库存的性能指标,如平均待加工工件数 $\bar{N}_w$ 、平均已完工工件数 $\bar{N}_c$ 、平均机器空闲时间 $\bar{I}$ 等。

(4) 多目标综合性能指标,如:最大完工时间与总拖后时间的综合,即 $C_{\max} + \lambda \sum_{i=1}^n T_i$; E/T 调度问题,即 $\sum (\alpha_i E_i + \beta_i T_i)$,其中 α_i 和 β_i 为权重。

其中,如果目标函数是完工时间的非减函数,则称为正规性能指标(regular measure),如 $C_{\max}$ 、 $\bar{C}$ 、 $\bar{F}$ 、 $F_{\max}$ 、 $\bar{L}$ 、 $L_{\max}$ 、 $\bar{T}$ 、 $T_{\max}$ 、 n_T 等;否则称为非正规性能指标,如提前/拖后惩罚代价最小。

此外,制造系统的调度问题还随着实际生产发展而不断扩展,以进一步贴近现实生产。与传统的调度问题不同,这些新扩展的调度问题或者突破了传统调度问题的某些假设,或者引入了由实际需求所决定的新型性能指标,例如,柔性制造系统调度、半导体或集成电路制造中的批处理调度、并行多处理机任务调度等。对这些调度问题的研究构成了当今调度问题领域中新的方向。

1.2.2 调度问题的特性

生产调度的对象决定了这一问题的复杂特性,其突出表现为调度问题的求解的计算复杂性、生产环境的动态不确定性和决策指标的多目标性。其具体表现如下文所述^[3,31,32]。

1. 计算复杂性

对于对称旅行商问题,所有可行路径有 $(n-1)!/2$ 条,对于每秒执行一百万次操作的计算机,即使城市数目 $n=20$ 也需要耗费 1929 年才能找到最优解。显然,对于较大规模问题,穷举求解是不切实际的。也就是说,有些优化算法所需的计算时间和存储空间是人们难以接受的,因此许多在算法上可解的问题在实践中并不一定可解。调度问题的求解复杂性远远大于旅行商问题,经典调度问题本身已经是一类极其复杂的组合优化问题,即使是单纯考虑加工周期最短的 Job-Shop 调度问题,当 10 个工件在 10 台机器上加工时,可行的半主动解数量也大约有 $k(10!)^{10}$ (k 为可行解比例,其值在 0.05~0.1 之间)^[33],而大规模生产过程中工件加工的调度总数简直就是天文数字;如果再加入其他评价指标,并考虑环境随机因素,问题的复杂程度可想而知。所以我们需要对调度计算复杂性有所了解。只有了解所研究问题的复杂性,才能有针对性地设计算法,进而提高优化效率。

算法的时间和空间复杂性对计算机的求解能力有重大影响。算法在时间和空间的需求量称为算法的时间复杂性和空间复杂性。问题的时间复杂性是指求解该问题的所有算法中时间复杂性最小的算法的时间复杂性,对问题的空间复杂性也可以做



类似定义。算法或问题的复杂性一般表示为问题规模 n 的函数,时间复杂度记为 $T(n)$,空间复杂性记为 $S(n)$ 。在算法分析和设计中,沿用实用性的复杂性概念,即把求解问题的关键操作(如加、减、乘、比较等运算)指定为基本操作,而把算法执行基本操作的次数定义为算法的时间复杂性,算法执行期间占用的存储单元则定义为算法的空间复杂性。在分析复杂性时,可以求出算法的复杂性函数 $p(n)$,也可以用复杂性函数主要项的阶 $O(p(n))$ 来表示。若算法 A 的时间复杂性为 $T_A(n) = O(p(n))$,且 $p(n)$ 为 n 的多项式函数,则称算法 A 为多项式算法,而把时间复杂性大于多项式时间的算法统称为指数时间算法。

P 类问题是具有多项式时间求解算法的问题类。但是迄今为止,对许多优化问题都没有找到求最优解的多项式时间算法,通常称比 P 类问题更宽泛的问题为不确定多项式(non-deterministic polynomial, NP)问题,即 NP 问题。对于 2 台机器的流水作业车间调度问题,可以用 Johnson 算法在多项式时间内求解,因此它是 P 类问题。而机器数不小于 3 的调度问题,已被证明是无法用多项式时间算法求解的 NP-hard 问题,而在实际应用中,机器数一般都会多于两台,所以如何求解该类调度问题吸引了众多学者的兴趣。

2. 多目标性

生产调度的总体目标通常是由一系列的调度计划约束条件和评价指标所构成的,在不同类型的生产企业和不同的制造环境下,这些约束条件和评价指标往往种类繁多、形式多样,这在很大程度上决定了调度目标的多样性。对于调度计划评价指标,通常考虑最多的是生产周期最短,此外还包括交货期最短、设备利用率最高、成本最低、延迟时间最短、提前或者拖期惩罚最小、在制品库存量最少等。在实际生产中有时不只是单纯考虑某一项要求,由于各项要求可能彼此冲突,因而在制订调度计划的过程中,必须综合权衡考虑。

3. 动态不确定性

实际生产过程是动态的,各个工件依次进入待加工状态,进入系统接受加工,完成加工的工件不断离开;同时,存在许多不确定因素,如人员劳动能力变化、原材料的差异、刀具磨损、机器故障、交货期变更或加工时间波动的累积等^[34]。调度计划执行期间所面临的制造环境很少与制订计划时考虑的完全一致,其结果即使不会导致既定计划完全作废,也常常导致需要对其进行不同程度的修改,以充分适应现场状况的变化。经典静态调度的研究忽略了生产需求的动态性和不确定性,造成理论与实际应用存在着一定距离。动态不确定性的处理是当今制造系统调度问题必须解决的一个关键问题。

调度问题的复杂特性,制约着相关技术的应用与发展,长期以来,使得该领域内寻求有效方法的众多努力显得难以完全满足实际应用的需要;同时,也正是因为存在如此巨大的挑战,多年来,对于这一问题的研究吸引了来自不同领域的大量研究及应用人员,他们提出了若干新的方法和技术,在不同程度上对实际问题的解决做出了各

自的贡献。

1.2.3 调度问题的研究概况

调度问题的研究与运筹学的发展应用基本同步。20世纪50年代,欧美国家工厂的生产线调度和管理现实对调度问题的研究提出了迫切的要求。1954年,Johnson提出了解决 $n/2/F/C_{\max}$ 和部分特殊的 $n/3/F/C_{\max}$ 问题的有效算法,揭开了调度问题研究的序幕^[35]。1975年,中国科学院研究员越民义、韩继业在《中国科学》发表了论文《 n 个零件在 m 台机床上的加工顺序问题》^[36],从而推动了我国调度理论的研究。

早期人们对调度问题的研究大都采用混合或纯粹整数规划、动态规划、分支定界(branch and bound, B&B)等数学方法,偏重于理论方面并且企图获得全局的最优解。20世纪60年代,人们逐渐认识到调度问题的复杂性,开始着手研究用简单的规则方法解决这个问题。至此,调度理论的主体结构基本建立起来。20世纪70年代到80年代初,以Cook^[37]、Lawler等^[38]计算理论专家为首的学者对可计算性和计算复杂性进行了深入研究,证明了绝大多数的调度问题是NP-hard问题,对于这类问题,并不存在有效的多项式时间求解方法^[8]。从此,人们开始寻找有效的启发式方法来解决它们,经典调度理论从而发展成熟。因此,Parker^[39]把1970年以前的时期称为BC(before complexity)时代,其后的则称为AD(advanced difficulty)时代。20世纪80年代以来,随着计算机技术、生命科学和工程科学等的相互交叉和相互渗透,通过模仿自然现象的运行机制而发展起来的启发算法开始应用于求解调度问题,并显示了解决大规模调度问题的潜力,例如,早期的遗传算法、神经网络、模拟退火和禁忌搜索算法;20世纪90年代以后,出现了约束满足算法、粒子群优化算法、蚁群优化算法和DNA算法等。目前,基于自然机制的启发式算法不断涌现和发展,其实用性和效率有了更大的提高。

经典调度理论虽然取得了重大进展,但为了研究需要,经典调度理论对实际的调度问题做了较多的提炼和简化。实际制造系统的调度问题不仅在模型上要比经典调度问题复杂多样,而且具有多资源、多目标、多约束、随机和不确定等特点。理论研究是为实践服务的,如何将丰富的调度研究成果应用于解决实际的调度问题就成了人们普遍关心的问题。从20世纪80年代开始,许多学者就一直在尝试并致力于将调度理论成果应用于实际调度问题,调度研究从此由理论体系结构转向应用研究阶段。

1.3 调度问题的研究方法

绝大多数调度问题是极困难的NP组合优化问题,其研究经历了一个较长的发展时期,在不同的发展阶段,研究的侧重点和手段也有较大差别。解决调度问题的方