

基于群智能优化的 车间调度方法

邓冠龙 顾幸生 崔喆 著

清华大学出版社



邓冠龙 顾幸生 崔喆 著

基于群智能优化的 车间调度方法

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

车间调度是当前国内外研究的热点领域之一,其常见求解方法包括启发式规则、分支定界以及近年来热门的各种群智能算法等。本书主要阐述车间调度中的单机、并行机、流水车间、混合流水车间问题模型及其常见求解方法,并阐述了迭代贪婪、差分进化、群搜索、和声搜索、人工蜂群算法等群智能算法的基本原理,重点阐述上述算法在车间调度中的应用,包括基于迭代贪婪算法的单机调度、基于离散差分进化算法的并行机调度和零空闲流水车间调度、基于群搜索算法的阻塞流水车间调度、基于和声搜索算法的中间存储有限流水车间调度、基于人工蜂群算法的混合流水车间调度以及群搜索算法在机器故障情况下的混合流水车间调度问题中的应用。

本书主要面向自动化、工业工程、机械工程、计算机科学与技术、管理科学与工程等学科的教师、学生、研究和开发人员。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

基于群智能优化的车间调度方法/邓冠龙,顾幸生,崔喆著. —北京:清华大学出版社,2016

ISBN 978-7-302-43682-9

I. ①基… II. ①邓… ②顾… ③崔… III. ①车间调度—最优化算法 IV. ①F406.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 084741 号

责任编辑:张 玥 战晓雷

封面设计:常雪影

责任校对:梁 毅

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm

印 张:12

字 数:259千字

版 次:2016年7月第1版

印 次:2016年7月第1次印刷

印 数:1~1000

定 价:39.50元

产品编号:069205-01

序 言

生产调度问题是将有限的资源分配给各项不同任务的决策过程,其目的是优化一个或多个目标,广泛存在于当今大多数的车间制造和生产系统中。优化的生产调度方案,可以提高生产效率,降低生产成本,从而为企业带来更好的经济效益和社会效益。因此,对生产过程进行有效合理的调度具有重要意义。随着生产技术的发展,人们面临的调度问题也更复杂,从实际应用的角度看,调度优化面临着强约束、高并行、大规模、不确定等复杂性,无论是问题建模还是算法求解都是非常具有挑战性的研究课题。

许多调度问题从复杂度理论上讲是 NP 难(NP-hard)的,经典的调度算法如启发式规则、分支定界法求解调度问题面临很大的困难,它们很难获得问题的最优解或获得最优解需要巨大的计算代价。近年来兴起的群智能算法在不需要复杂数学模型的基础上即可获得令人满意的调度解,是解决调度问题的有效方法,得到了国内外学者的广泛关注。这类算法通常利用生物、自然或人类社会中存在的智能现象,设计有效的更新机制,借助计算机的迭代运算,搜索问题的可行解,从而获得复杂难题的最优解或满意解。

目前,国内外对车间调度问题的研究已取得一定进展,考虑的车间问题涵盖了单机、并行机、流水车间、作业车间、开放车间等,使用的智能方法包括遗传算法、模拟退火算法、禁忌搜索算法、微粒群算法等。近年来在车间调度领域的应用研究如雨后春笋般涌现,特别是美国学者 Storn 和 Price 提出的差分进化算法,已成为该领域的热点研究算法。另一方面,新的算法也在车间调度领域崭露头角。例如,Geem 等提出了一种新型智能优化算法——和声搜索算法;Karaboga 等模仿蜜蜂觅食行为,提出了人工蜂群算法;He 等受到自然界动物群体觅食以及群居行为的启发,提出了群搜索优化算法;Ruiz 和 Stutzle 提出了针对流水车间调度的迭代贪婪算法。这些群智能方法经过适当的改编或改进后,在车间调度领域都得到了有效的应用。然而,部分算法研究的历史较短,在车间调度上的应用也不够广泛和深入,因此,目前国内关于这些群智能算法在车间调度应用上的专门书籍并不多见。鉴于此,作者基于多项国家自然科学基金和国家 863 项目的研究,将课题组近几年的研究成果和博士论文融合,汇编成本著作。

本书主要阐述车间调度中的单机、并行机、流水车间、混合流水车间问题模型及其求解方法,并重点阐述迭代贪婪算法、离散差分进化算法、群搜索优化算法、和声搜索算法、人工蜂群算法在车间调度问题上的应用研究。全书分为 8 章:第 1 章对生产调度问题进行概述,介绍目前常用的求解方法;第 2 章介绍具有顺序相关准备时间的单机调度问题及其增强迭代贪婪算法求解;第 3 章介绍基于混合离散差分进化算法的以总滞后为目标的

同等并行机调度;第4章介绍基于混合离散差分进化算法的零空闲流水车间调度;第5章介绍基于群搜索算法的带阻塞流水车间调度;第6章介绍基于和声搜索算法的中间存储有限流水车间调度;第7章介绍基于人工蜂群算法的混合流水车间调度;第8章介绍机器故障情况下的混合流水车间调度及其群搜索算法求解。

本书可作为自动化、工业工程、机械工程、计算机科学与技术、管理科学与工程等学科的本科生、研究生和教师的参考书,也可供有关科研和开发人员参考。由于作者水平有限,时间仓促,本书许多内容还有不足之处,恳请读者批评指正。

本书研究工作得到了以下专家教授的指导和建议:华东理工大学俞金寿教授、王行愚教授、黄道教授、侍洪波教授、上海交通大学李少远教授、杭州电子科技大学薛安克教授、东华大学丁永生教授、上海大学费敏锐教授等,作者在此表示感谢。同时,特别感谢对本书工作热心支持的鲁东大学王刚教授。最后,感谢国家自然科学基金项目(61403180, 61573144, 61174040)、国家863高技术研究发展计划项目(2009AA04Z141)、鲁东大学引进人才项目(LY2013005)对本书工作的资助。

邓冠龙

2015年12月

于烟台

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 生产调度问题概述	2
1.2.1 生产调度问题的定义	2
1.2.2 生产调度问题的起源和发展	2
1.2.3 生产调度问题的分类	3
1.2.4 生产调度问题的描述	4
1.2.5 生产调度问题的求解方法	7
1.3 本书内容和章节安排	15
第 2 章 基于增强迭代贪婪算法的单机调度	18
2.1 引言	18
2.2 最小化总加权滞后的单机调度问题	20
2.3 求解单机调度问题的增强迭代贪婪算法	20
2.3.1 基本迭代贪婪算法	20
2.3.2 针对单机总加权滞后调度的增强迭代贪婪算法设计	22
2.4 用于交换移动的删除规则和加速方法	27
2.5 仿真研究	30
2.5.1 参数设置	30
2.5.2 EIG 算法与其他算法的比较	33
2.5.3 EIG 算法最佳性能测试	38
2.6 小结	42
第 3 章 基于离散差分进化算法的并行机调度	43
3.1 引言	43
3.2 最小化总滞后的并行机调度问题	44
3.3 求解并行机调度问题的混合离散差分进化算法	45
3.3.1 标准差分进化算法	45

3.3.2	离散差分进化算法	47
3.3.3	针对同等并行机调度的混合离散差分进化算法设计	49
3.4	仿真研究	54
3.4.1	参数设置	54
3.4.2	HDDE 算法与 DDE、CSPSO 算法的比较	58
3.4.3	HDDE 算法与 BAB 算法的比较	62
3.5	小结	63
第 4 章	基于离散差分进化算法的零空闲流水车间调度	65
4.1	引言	65
4.2	最小化 makespan 的零空闲流水车间调度问题	67
4.3	用于插入邻域的加速方法	70
4.4	求解零空闲流水车间调度问题的混合离散差分进化算法	71
4.5	仿真研究	74
4.5.1	参数设置	74
4.5.2	加速方法的验证	78
4.5.3	HDDE 算法与 IG_{LS} 、HDPSO、 DDE_{LS} 、HDDE 算法的比较	80
4.6	小结	85
第 5 章	基于群搜索优化算法的带阻塞流水车间调度问题研究	86
5.1	引言	86
5.2	最小化总流水时间的带阻塞流水车间调度问题	87
5.3	基本群搜索优化算法	90
5.4	求解带阻塞流水车间调度问题的离散群搜索优化算法	93
5.4.1	问题编码及初始化	93
5.4.2	发现者	94
5.4.3	追随者	95
5.4.4	游荡者	96
5.4.5	算法流程	96
5.4.6	算法复杂度分析	97
5.5	仿真研究	97
5.5.1	仿真环境与对象	97
5.5.2	算法参数讨论	97
5.5.3	算法性能测试	100

5.6	小结	105
第 6 章	基于和声搜索算法的中间存储有限流水车间调度问题研究	106
6.1	引言	106
6.2	最小化总流水时间的中间存储有限流水车间调度问题	108
6.3	基本和声搜索算法	110
6.4	求解中间存储有限流水车间调度问题的混合离散和声搜索算法	114
6.4.1	和声个体的编码与初始化	114
6.4.2	新和声个体的构造	114
6.4.3	和声记忆库的更新方法	115
6.4.4	差分进化策略	116
6.4.5	局部搜索	116
6.4.6	算法流程	117
6.4.7	算法复杂度分析	117
6.5	仿真研究	117
6.5.1	仿真环境与对象	117
6.5.2	算法参数讨论	118
6.5.3	算法仿真测试	121
6.5.4	HDHS 算法与其他算法在不同中间存储大小下的比较	122
6.6	小结	129
第 7 章	基于人工蜂群算法的混合流水车间调度问题研究	130
7.1	引言	130
7.2	混合流水车间调度问题	132
7.2.1	问题的描述	132
7.2.2	问题的数学模型	132
7.3	基本人工蜂群算法	135
7.4	求解混合流水车间调度问题的改进离散人工蜂群算法	137
7.4.1	个体的编码与初始化	137
7.4.2	引领蜂	138
7.4.3	跟随蜂	138
7.4.4	侦察蜂	139
7.4.5	算法流程	139
7.4.6	算法复杂度分析	140

7.5	仿真研究	141
7.5.1	仿真环境与对象	141
7.5.2	算法参数讨论	141
7.5.3	算法仿真测试	143
7.5.4	各算法求解 Carlier 和 Neron 算例的结果比较	144
7.5.5	各算法求解 Liao 算例的结果比较	149
7.6	小结	152
第 8 章	机器故障情况下的混合流水车间调度问题研究	153
8.1	引言	153
8.2	机器故障情况下的混合流水车间调度问题	154
8.2.1	问题的描述	154
8.2.2	针对机器故障的解决方法	155
8.3	求解带机器故障的混合流水车间调度问题的改进离散群搜索优化算法	160
8.3.1	问题编码及种群初始化	160
8.3.2	改进的群搜索优化操作	160
8.3.3	算法流程	162
8.4	仿真研究	163
8.4.1	仿真环境与对象	163
8.4.2	算法参数讨论	163
8.4.3	IDGSO 算法与 PSO、RKGA、IA 算法的比较	165
8.4.4	带机器故障与无故障的混合流水车间调度问题仿真实验	167
8.5	小结	168
	参考文献	169

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

现代化的制造业是国民经济的支柱产业,对我国国民经济的发展有着不可替代的作用,其发展水平直接影响到国家的经济基础和综合实力。随着现代科学技术的发展,生产规模不断扩大,复杂性越来越高,市场竞争也愈加激烈,因此,对企业的生产计划管理和控制有着更高的要求。生产调度作为制造企业生产计划管理和控制的核心环节和关键技术,正扮演着越来越重要的角色。

生产调度是将优先的资源分配给在一定时间内的不同任务的决策过程,它需要在满足各种系统约束的条件下使某个或某些性能指标最优。在制造业环境中,制造部门提交的订单必须细化成带有工期的工作。这些工作常常需要在一个加工中心的机器上以特定的次序或顺序进行。企业制造过程调度需要根据生产计划、生产工艺、订单交货期及制造过程的实时状态数据等信息,制定较短一段时间内的制造过程作业计划,一般会涉及多项与作业计划相关的调度决策,包括操作的加工机器和各机器上的工件加工顺序、加工开始结束时间等关键调度决策及其他辅助性调度决策等^[1]。

对生产调度的研究具有两方面的重要意义。第一,它具有重要的理论意义和学术价值。调度问题作为一类复杂的组合优化问题,其应用背景涵盖多个领域,几十年来已经被抽象为一类数学和运筹学问题。很多调度问题已被证明为 NP 难(NP-hard)的,采用传统的调度算法如数学规划方法、启发式算法求解难以取得令人满意的效果,因此采用新型的有效算法求解该类问题具有重要的理论意义和学术价值。第二,它有助于提高企业经济效益和市场竞争能力。近年来,随着企业间竞争越来越激烈,客户的个性化需求越来越强,企业只有通过提高生产管理水平和制造自动化水平,才能缩短制造周期,提高生产效率,减少产品滞后现象,提高客户满意度,降低生产成本,最终提高企业的经济效益和市场竞争能力。而采用合理、适用、有效、优化的调度方案,是提高生产管理水平和制造自动化水平的关键。

对生产调度问题的研究,始于 20 世纪 50 年代,Johnson^[2]首次提出了两机流水车间调度问题的最优算法(Johnson 规则)。之后,人们逐渐考虑更复杂的问题,分支定界(Branch And Bound, BAB)方法、动态规划(Dynamic Programming, DP)方法等精确算法以及基于调度规则的启发式方法等在单机、并行机、流水车间和作业车间等典型的调度问题中得到广泛应用。然而,由于调度问题的复杂性,上述精确算法仍难以解决某些困难

的调度问题,或者即使可以求解,对大规模算例却耗时巨大,而启发式方法得到的解却往往不是最优解,甚至不能让人满意。近年来,在人工智能技术和计算机技术的推动下,研究者们提出了许多元启发式算法,如遗传算法、禁忌搜索算法、模拟退火算法、蚁群优化算法、粒子群优化算法等求解生产调度问题。这类方法处理约束比较容易,对目标函数限制少,可获得优化问题的满意解,适用于各种复杂调度问题,目前已显现出较好的应用前景。本文研究了单机、并行机和流水车间调度的问题特性,给出了一些广泛适用的数学结论,并提出了几种改进的元启发式算法,将其分别应用于单机、并行机和流水车间调度问题中,同时,探讨了加工时间不确定的随机调度问题。

1.2 生产调度问题概述

1.2.1 生产调度问题的定义

生产调度^[3]是指在生产任务给定的前提下,确定合理的生产决策,即按时间的前后,将有限的人力物力资源分配给不同的工作任务,使预定的目标最优或近似最优的问题。从数学规划的角度看,生产调度问题可表达为在等式或不等式约束下对目标函数的优化。生产调度涉及的约束有产品的投产期、交货期、生产能力、加工顺序、加工设备和原料的可用性、批量大小、加工路径、成本限制等,目标函数可以是成本最低、库存费用最少、生产周期最短、总滞后最小、生产切换最少、三废最少、设备利用率最高等。

1.2.2 生产调度问题的起源和发展

自从1954年Johnson^[4]提出解决两台机器流水车间(flow shop)调度问题的最优Johnson规则以来,调度问题便引起了许多数学、运筹学、工业工程界学者的关注。在最初的十年,人们主要致力于用组合分析的方法来求解调度问题,且求解的问题主要集中在单机、并行机和流水车间调度。有趣的是,Johnson首次研究的调度问题并不是最为简单的单机情形,而是直接给出了具有两台机器以makespan为目标的流水车间调度问题的最优算法。

基于组合分析的研究到20世纪60年代面临着更具挑战性的调度问题,于是人们尝试采用分支定界和动态规划的方法来进行求解。首次采用分支定界方法来求解流水车间调度问题的研究者是Lomnicki^[5]及Ignall和Schrage^[6],他们分别独自提出了分支定界方法来求解最小化makespan的三台机器的流水车间问题。20世纪六七十年代,在单机和作业车间(job shop)问题上也取得了一些研究进展。值得一提的是,Roy和Sussman^[7]于1964年提出了作业车间问题的析取图(disjunctive graph)表示法,该表示法自提出以来一直受到广泛关注并在作业车间调度问题研究中得到大量应用。

到 20 世纪七八十年代,随着计算复杂度理论的发展以及对各种调度问题的分类方案的形成,经典调度理论逐渐成熟。Cook^[8]证明了许多调度问题是 NP 难的,Miller^[9]给出了用于算法求解优化问题或判定问题的计算复杂度理论。在计算复杂度理论方面,P 是否等于 NP 的问题至今仍是世界科学界的一大难题。在这一阶段,人们根据各种调度问题的复杂性层次对调度问题进行了细致的分类。最为重要的研究工作之一就是美国贝尔实验室 Graham 等^[10]对调度发展进行总结的综述,其中,首次提出了调度问题的三元表示法,迄今该表示法仍被广泛使用。

从 20 世纪八十年代至今,调度问题的研究在理论和应用上都取得了重大发展。尤其在解决实际调度问题方面,研究者们尝试用基于人工智能、计算智能、实时智能的元启发式算法来解决实际调度问题,并取得了令人欣慰的效果。近年来,由于各种元启发式算法的提出以及更加复杂情况下调度问题的提出,调度问题的研究前景一片光明。

1.2.3 生产调度问题的分类

生产调度问题的分类方法有很多^[11],主要有以下几种:

(1) 按生产需求的不同,可分为开放车间(open shop)和封闭车间(closed shop)。开放车间是指所有的生产由客户需求来决定,无成品库存储备;封闭车间问题是指客户的需求由成品库存储备来满足,而生产任务由库存量来决定。

(2) 根据加工系统的复杂度,生产调度可以分为单机调度、并行机调度、流水车间调度、作业车间调度、连续过程调度等几个基本类型。单机调度是指所有的操作任务都在一台机器上完成,需要对任务进行优化排队;并行机调度是指所有加工任务均只有一道工序,能够完成加工任务的设备有并行的多台,任务可以在任一空闲设备上加工;流水车间调度假设所有工件都在同样的设备上加工,并有一致的加工操作和加工顺序;作业车间调度是最一般的调度类型,它是指由 m 台不同的机器加工 n 个有特定加工路线(顺序)的工件,不同工件的工序间没有顺序约束,工序加工不能中断;连续过程调度是连续化大规模生产过程中生产负荷的确定。实际的调度问题通常是上述几种调度类型的组合。

(3) 根据优化准则,可以分为基于代价的调度和基于性能的调度两大类。代价包括为了实现调度方案所消耗的各种费用和所造成的损失,如运行费用、运输费用、存储费用和延期交货损失等。性能主要包括设备利用率、最大完成时间、拖延加工任务的百分比等。虽然在理论分析上,大部分只注意调度的性能,但在实际生产中,通常要综合考虑代价和性能两方面因素。

(4) 根据生产环境的特点,可将调度分为确定性调度和不确定性调度。前者是指调度问题中所用的参数都是确定的数值,建立的数学模型及求解比较简单,但适用的范围较小。后者是指生产过程中的某些参数不是固定不变的,而是与处理批量的大小、处理时

间、资源约束等不确定因素有关。

(5) 根据调度环境的特点,可将调度分为静态调度和动态调度。静态调度是指待加工的工件集合和加工时间是确定的,且生产时全部待加工的工件已经全部到位,即静态调度要求利用整个生产系统的全部信息,是信息完全的调度;而动态调度是指加工工件的数目和相关的参数是随时间变化的,或是在调度任务的执行过程中出现了不可预测的事件。由于生产系统的各种信息不可能完全获得,所以是信息不完全的调度。

1.2.4 生产调度问题的描述

在所考虑的调度问题中,工作和机器的数量被假设成有限的,分别用 n 和 m 表示。通常,下标 j 指一项工作,而下标 i 指一台机器。如果一项工作需要许多加工步骤或操作,则数对 (i, j) 指的是工作 j 在机器 i 上的加工步骤或操作。下面给出一些和 j 相关的数据:

(1) 加工时间(p_{ij})。表示工作 j 在机器 i 上的加工时间。如果工作 j 的加工时间独立于机器或者工作只在一台给定的机器上进行加工,则省略下标 i 。

(2) 提交日期(r_j)。也称准备日期,是指工作到达系统的时间,即工作 j 可以开始加工的最早时间。

(3) 工期(d_j)。也称交货期,表示承诺的发货或完成时间(承诺将工作交给顾客的日期)。允许在工期之后完成一项工作,但那样会受到惩罚。如果工期必须满足,则称为最后期限,表示为 \bar{d}_j 。

(4) 权重(w_j)。权重是一个优先性因素,表示工作 j 相对于系统内其他工作的重要性。例如,这个权重可能表示保留这项工作在系统中的实际费用。这个费用可能是持有或库存的成本;也可能表示已经附加在工作上的价值。

一个调度问题可以用三元组 $\alpha/\beta/\gamma$ 来描述。 α 域描述机器环境并包含单一一项; β 域提供加工特征和约束的细节,可能根本不包含任何一项,也可能有多个选项。 γ 域描述最小化的目标,常常包含唯一一项。

在 α 域中可规定的机器环境大致有以下几项:

(1) 单一机器(1)。单一机器是所有机器环境中最简单的,是其他复杂机器环境的特例。

(2) 并行同速机(Pm)。并行的 m 台速度相同的机器。工作 j 需要单一操作,可能在 m 台机器的任何一台上加工,也可能在属于某个给定子集的任何一台机器上进行加工。如果不允许工作 j 仅简单地任何一台机器上加工,而必须在属于某个特定子集 M_j 的一台机器上进行加工,那么项 M_j 出现在 β 域中。

(3) 并行异速机(Qm)。有 m 台并行的具有不同速度的机器。机器 i 的速度记作 v_i 。工作 j 耗费在机器 i 上的时间 $p_{ij} = p_j/v_i$ (假设工作 j 所有的加工都在机器 i 上进行)。这

种环境称为一致机器。如果所有的机器具有相同的速度,那么这种环境和前一种相同。

(4) 并行的无关联的机器(Rm)。这种环境是前一种的更一般化。有 m 台不同的并行机器。机器 i 可以速度 v_{ij} 加工工作 j 。工作 j 耗费在机器 i 上的时间 $p_{ij} = p_j/v_{ij}$ (假设工作 j 所有的加工都在机器 i 上进行)。如果机器的速度独立于工作,那么这种环境和前一种相同。

(5) 流水车间(Fm)。有串行的 m 台机器。每项工作都必须经过每台机器加工。所有工作都必须遵循相同的加工路径(即它们必须首先在第一台机器上加工,然后是第二台,以此类推)。在一台机器上完成加工后,工作加入到下一台机器的队列中。通常,假设所有的队列都遵循先入先出(First In First Out, FIFO)的规则。如果 FIFO 规则有效,则这种流水车间成为排列流水车间, β 域中包含项 prmu。

(6) 柔性流水车间(FFc)。柔性流水车间是流水车间和并行机环境的一般化。代替 m 台串行机器的是 c 个串行工位,每个工位有许多并行同速机。每项工作必须先经过工位 1,然后经过工位 2,以此类推。每个工位起到并行机组的作用。在每个工位上,工作 j 只需要在一台机器上加工,而每台机器都可以完成这个工作。一个工位的队列可以遵循也可以不遵循先来先服务(First Come First Service, FCFS)的规则。

(7) 作业车间(Jm)。在有 m 台机器的作业车间里,每项工作都有它自己预先确定的加工路径。作业车间可以分为两种:一项工作最多访问一台机器一次的作业车间和一项工作可能访问一台机器多次的作业车间。在后一种情形中, β 域中包含表示再循环的项 recrc。

(8) 柔性作业车间(FJc)。柔性作业车间是作业车间和并行机环境的一般化。代替 m 台机器的是 c 个工作中心,每个工作中心有许多并行同速机。每项工作遵循它自己的加工路径通过车间,工作 j 只需要在每个工作中心的一台机器上加工,而每一台机器都可以完成该工作。如果一项工作需要它自己通过车间的加工路径上访问一个工作中心多次,那么 β 域中包含表示再循环的项 recrc。

(9) 开放车间(Om)。有 m 台机器。每项工作在每台机器上都进行多次加工。但有些加工时间可以是零。对每项工作的加工路径没有任何限制。允许调度者为每项工作确定加工路径,而不同的工作可以有不同的加工路径。

β 域中给出的加工约束和特定限制可能包括多个选项。 β 域中可能的项如下:

(1) 提交日期(r_j)。如果这个符号出现在 β 域中,工作 j 不可能在它的提交日期前开始加工。如果没有提交日期的限制,则可以在任何时候开始。注意,工期不在该域中规定,目标函数的类型可给出是否有工期的要求。

(2) 顺序相关的准备时间(s_{jk})。 s_{jk} 表示工作 k 紧跟在工作 j 之后加工需要的准备时间。如果工作 j 和 k 之间的准备时间跟机器 i 相关,那么包含下标 i (即 s_{ijk})。如果 β 域中没有出现准备时间,则认为准备时间为零或者已经包含在加工时间中。

(3) 中断(prmp)。中断允许调度者在任何时间中断一项工作的加工,而把另一项工作放到该机器上。中断的工作已经进行的加工不会丢失,当它重返机器上时,只需要完成剩下的加工即可。没有 prmp 意味着工作在完成加工之前需一直保留在该机器上。

(4) 优先约束(prec)。可能出现在单机或并行机环境中,在一项工作开始加工前,另一项或多项工作必须先完成。

(5) 机器适用限制(M_j)。可能出现在同等并行机环境中,表示工作 j 必须在集合 M_j 中的某台机器上加工。

(6) 排列(prmu)。在流水车间环境中可能出现的约束是每台机器前的队列遵循 FIFO 规则,这意味着对所有机器而言,经过它的工作的排列顺序是一致的。

(7) 有限缓冲(limited buffer)。如果一个流水车间在两台连续的机器之间只有有限的缓冲区来存放工作,那么可能出现当缓冲区满的时候,上游的机器即使加工好了某项工作,仍不能释放它。这时候加工完的工作不得不保留在上游机器上;从而阻塞那台机器加工别的工作。一种普遍被考虑的情况是任何两台连续的机器之间缓冲为零,这时用 block 表示。

(8) 零等待(no-wait, nwt)。零等待限制是可能发生在流水车间中的现象。它要求工作不允许在任意两台机器之间等待,这使得一项工作可能不得不推迟它在第一台机器上的加工时间,以保证后续加工过程不必等待任何机器。这项限制的明显的例子就是在轧钢厂中,不允许钢板等待,因为等待过程中它会冷却。明显的,零等待意味着 prmu。

(9) 零空闲(no-idle)。零空闲限制是可能发生在流水车间中的另一种现象。它对机器提出了要求,每台机器一旦开始加工某个工作,则需要不间断地把所有工作都加工完,不允许空闲。它可能出现在某些机器不能空闲或空闲导致巨大代价的生产环境中,如某些纺织行业。

(10) 再循环(recrc)。在作业车间或柔性作业车间中,当一项工作可能访问一台机器或加工中心超过一次的时候,recrc 包含在 β 域中。

当然,还有很多其他可能出现在 β 域中的项,通常它们都易于理解。

出现在 γ 域的最小化的目标取决于调度任务。通常考虑的目标都跟工作的完成时间相关。工作 j 在机器 i 上的完成时间记作 C_{ij} ,工作 j 离开最后一台机器的时间记作 C_j ,通常有以下一些最小化的目标:

(1) 制造期(C_{\max})。定义为 $\max(C_1, C_2, \dots, C_n)$,也称为 makespan。makespan 越小,通常意味着机器利用率越高。

(2) 最大延迟(L_{\max})。定义为 $\max(L_1, L_2, \dots, L_n)$,其中延迟 $L_j = C_j - d_j$ 。它度量了工期延误的最坏情况。

(3) 加权完成时间和($\sum w_j C_j$)。它给出了一个由调度引起的所有持有或库存成本

指标。特别地,对单一的权值,它可表达为完成时间和 $\sum C_j$ 。

(4) 加权总流水时间 ($\sum w_j F_j$)。其中流水时间定义为 $F_j = C_j - r_j$ 。对于没有给定提交时间的调度环境,流水时间等同于完成时间。类似地可以定义总流水时间 ($\sum F_j$)、最大流水时间 (F_{\max})。

(5) 加权总滞后 ($\sum w_j T_j$)。其中滞后定义为 $T_j = \max(C_j - d_j, 0)$ 。这是比加权完成时间更一般化的成本函数。类似地可以定义总滞后 ($\sum T_j$)、最大滞后 (T_{\max})。

(6) 加权提前滞后 ($\sum w'_j E_j + \sum w''_j T_j$)。其中提前惩罚定义为 $E_j = \max(d_j - C_j, 0)$ 。前面的目标(1)到(5)都是所谓的正规指标。正规指标是指 C_j 的非减函数的指标。而加权提前滞后是最近开始研究的一个不正规的指标。以它为指标的调度也称 E/T 调度。E/T 调度的提出是为了适应 JIT(Just In Time, 准时制)生产模式的需要,准时制是在 20 世纪 80 年代出现的,首先在日本的制造业中得到广泛应用,并很快被西方国家的制造业所接受,其基本内涵是,从企业利润角度出发,对产品的加工以满足交货期为目标,既不能提前交货,也不能延期交货,E/T 调度正反映了这方面的要求。

1.2.5 生产调度问题的求解方法

尽管对调度问题的研究已经有几十年的历史,从理论上和应用上也提出了许多调度方法,但由于生产调度问题的多样性以及复杂性,至今没有普遍适用的求解方法。已有的方法可归结为传统数学运筹学方法、启发式规则方法和元启发式规则方法。

1. 传统数学运筹学方法

这类方法通过精确求解解析模型,或通过近似求解解析模型获得最优解或次优解。该类方法一般只针对某些特定的问题才有效,即非常依赖于具体问题。典型的方法有以下三种。

1) 分支定界法(Branch And Bound, BAB)

该方法通常基于调度问题的整数规划模型,是一种复杂的接近完全枚举的方法,它可适用于很多种组合优化问题。能求解到全局最优解也是它的一大优势。它针对小规模问题的求解比较有效,但面临大规模问题时,其巨大的计算量是不可忍受的。这类方法仍有很大改善空间,因为适当的设计可以大大减少它的计算量。分支定界法试图将问题分解为子问题,这个过程称为分支。对分支的每个节点,通过确定该节点出发的所有部分调度方案的目标值下界来删除,这个过程称为定界。

2) 束搜索法(Beam Search, BS)

束搜索法基于分支定界法。分支定界法的主要缺点是它通常非常费时,因为需要考虑的节点非常多。束搜索法改善了这一缺点,它不需要评价所有给定层上的所有节点,只

选择它认为的具有潜力的节点进一步进行分支,该层上其余的节点将被永久排除。保留的节点数目称作这个搜索法的束宽度。这种方法的关键在于确定哪些节点最具有潜力,从而保留它们。由于采用一定的方法排除了很多节点,该方法求解的计算代价要小于分支定界法,但是不能保证取得问题的最优解。束搜索法的一种细化方法是过滤束搜索(Filtered Beam Search, FBS)。它使用一种基于过滤器宽度的概念来进一步约束分支的空间。具体地说,它使用一个过滤器宽度,在以同一个水平上选定的束宽度为数目的节点中,其后继节点产生的个数最多为过滤器宽度规定的个数。

3) 动态规划方法(Dynamic Programming, DP)

动态规划方法基本上是一种完全枚举算法,它尝试通过分治法(divide and conquer),使需要进行的计算量最小化。这种方法通过解决一系列子问题来找到最优解。它确定了每个子问题的最优解以及每个子问题对于最终目标函数的贡献。在每一次迭代过程中,它确定一个子问题的最优解,这个解大于以往求解的子问题的解。为了求解当前的子问题,它使用了求解以往所有子问题获得的信息。动态规划通过3种方程即可描述:初始状态、一个递归关系和一个最优值方程。不过,可用动态规划直接求解的调度问题非常有限,一个例子是 $1 // \sum w_j T_j$ 问题^[12]。

2. 启发式规则方法

启发式规则(heuristics)依据一定的规则和策略来决定下一步需要调度的工作,从而产生较好的调度解。它的优点是直观、简单、实用,花费的计算代价小,易于实现,在实际生产中得到了广泛的应用。但它面临复杂的调度问题时难以得到全局最优解,甚至有时候解的质量较差。研究者们针对各种不同的调度问题提出了各种调度规则。下面介绍几种常见的启发式规则^[13]。

1) SPT 规则

最短加工时间(shortest processing time)优先。按照加工时间从小到大排列。该规则对 $P_m // \sum C_j$ 是最优的。

2) WSPT 规则

加权最短加工时间(weighted shortest processing time)优先。按照 w_j/p_j 的降序排列工作,是 SPT 的加权情形。该规则对 $1 // \sum w_j C_j$ 是最优的。

3) EDD 规则

最早工期(earliest due date)优先。按照工期从小到大排列。该规则对 $1 // L_{\max}$ 是最优的。

4) ATC 规则

明显滞后成本(apparent tardiness cost)规则^[13]。该规则针对 $1 // \sum w_j T_j$ 问题具有较好的效果。ATC 根据一项指数每次调度一项工作。每次机器空闲时,选择具有最高排序