



智能

科/学/技/术/著/作/丛/书

# 基于进化优化的多目标 批量流水线调度

韩玉艳 巩敦卫 桑红燕 刘莉莉 著

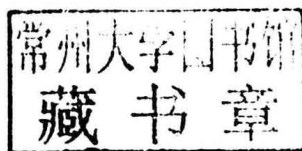


科学出版社

智能科学技术著作丛书

# 基于进化优化的多目标 批量流水线调度

韩玉艳 巩敦卫 著  
桑红燕 刘莉莉



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

多目标批量流水线调度问题普遍存在于制造业、信息服务业等,但是,已有的解决该问题的方法非常少,采用进化优化方法求解多目标批量优化问题成为近年来进化优化界的热点研究方向之一。本书阐述用于求解多目标、多约束以及参数具有不确定性的批量流水线调度理论与进化优化方法,主要包括构建多目标批量、多目标阻塞批量、加工时间不确定及机器故障的多目标阻塞批量流水线调度问题的数学模型,以及基于人工蜂群算法和非支配排序遗传算法框架,提出改进的多目标优化算法,用于高效进化求解上述问题。本书还给出不同方法在基准测试用例的应用,以及全面详细的算法对比结果。本书是一部用进化优化方法解决多目标批量流水线调度问题的专著,也是作者近4年来在多项国家和省部级科研项目资助下取得的一系列研究成果的结晶。

本书可供理工科高校自动化、计算机等相关专业的教师及研究生、自然科学和工程技术领域的研究人员学习与参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于进化优化的多目标批量流水线调度/韩玉艳等著. —北京:科学出版社,2018.2

(智能科学技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-056603-4

I. ①基… II. ①韩… III. ①流水生产线—生产调度—最优化算法  
IV. ①F406.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 034079 号

责任编辑:张海娜 赵微微 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年2月第一版 开本:720×1000 B5

2018年2月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:244 000

定价:85.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《智能科学技术著作丛书》编委会

名誉主编：吴文俊

主 编：涂序彦

副 主 编：钟义信 史忠植 何华灿 何新贵 李德毅 蔡自兴 孙增圻  
谭 民 韩力群 黄河燕

秘 书 长：黄河燕

编 委：(按姓氏汉语拼音排序)

蔡庆生(中国科学技术大学)

蔡自兴(中南大学)

杜军平(北京邮电大学)

韩力群(北京工商大学)

何华灿(西北工业大学)

何 清(中国科学院计算技术研究所)

何新贵(北京大学)

黄河燕(北京理工大学)

黄心汉(华中科技大学)

焦李成(西安电子科技大学)

李德毅(中央军委联合参谋部第六十一研究所)

李祖枢(重庆大学)

刘 宏(北京大学)

刘 清(南昌大学)

秦世引(北京航空航天大学)

邱玉辉(西南师范大学)

阮秋琦(北京交通大学)

史忠植(中国科学院计算技术研究所) 孙增圻(清华大学)

谭 民(中国科学院自动化研究所) 谭铁牛(中国科学院自动化研究所)

涂序彦(北京科技大学)

王国胤(重庆邮电学院)

王家钦(清华大学)

王万森(首都师范大学)

吴文俊(中国科学院数学与系统科学研究院)

杨义先(北京邮电大学)

于洪珍(中国矿业大学)

张琴珠(华东师范大学)

赵沁平(北京航空航天大学)

钟义信(北京邮电大学)

庄越挺(浙江大学)

## 《智能科学技术著作丛书》序

“智能”是“信息”的精彩结晶，“智能科学技术”是“信息科学技术”的辉煌篇章，“智能化”是“信息化”发展的新动向、新阶段。

“智能科学技术”(intelligence science&technology, IST)是关于“广义智能”的理论方法和应用技术的综合性科学技术领域,其研究对象包括:

- “自然智能”(natural intelligence, NI),包括“人的智能”(human intelligence, HI)及其他“生物智能”(biological intelligence, BI)。

- “人工智能”(artificial intelligence, AI),包括“机器智能”(machine intelligence, MI)与“智能机器”(intelligent machine, IM)。

- “集成智能”(integrated intelligence, II),即“人的智能”与“机器智能”人机互补的集成智能。

- “协同智能”(cooperative intelligence, CI),指“个体智能”相互协调共生的群体协同智能。

- “分布智能”(distributed intelligence, DI),如广域信息网、分散大系统的分布式智能。

“人工智能”学科自 1956 年诞生以来,在起伏、曲折的科学征途上不断前进、发展,从狭义人工智能走向广义人工智能,从个体人工智能到群体人工智能,从集中式人工智能到分布式人工智能,在理论方法研究和应用技术开发方面都取得了重大进展。如果说当年“人工智能”学科的诞生是生物科学技术与信息科学技术、系统科学技术的一次成功的结合,那么可以认为,现在“智能科学技术”领域的兴起是在信息化、网络化时代又一次新的多学科交融。

1981 年,“中国人工智能学会”(Chinese Association for Artificial Intelligence, CAAI)正式成立,25 年来,从艰苦创业到成长壮大,从学习跟踪到自主研发,团结我国广大学者,在“人工智能”的研究开发及应用方面取得了显著的进展,促进了“智能科学技术”的发展。在华夏文化与东方哲学影响下,我国智能科学技术的研究、开发及应用,在学术思想与科学方法上,具有综合性、整体性、协调性的特色,在理论方法研究与应用技术开发方面,取得了具有创新性、开拓性的成果。“智能化”已成为当前新技术、新产品的发展方向 and 显著标志。

为了适时总结、交流、宣传我国学者在“智能科学技术”领域的研究开发及应用成果,中国人工智能学会与科学出版社合作编辑出版《智能科学技术著作丛书》。需要强调的是,这套丛书将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力以及对社会和国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大智能科学技术工作者的积极参与和大力支持,以及编委们的共同努力,《智能科学技术著作丛书》将为繁荣我国智能科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

祝《智能科学技术著作丛书》出版,特赋贺诗一首:

**智能科技领域广  
人机集成智能强  
群体智能协同好  
智能创新更辉煌**

涂序彦

中国人工智能学会荣誉理事长

2005年12月18日

## 前 言

在传统的流水线调度中,工件是不可分割的,且仅当一个完整的工件加工完毕之后,才被允许传送到下游机器,这样造成下游机器等待时间较长。而实际生产中,同一工件往往包含若干数量的批次,例如,在紧固件加工过程中,工件由成批的螺栓、螺柱、螺钉、螺母、垫圈或销等组成。因此,工件可以分成若干小批量,当一个小批量加工完成后,可允许传送到下游机器加工,而不必等待所有小批量都加工完,这样能够缩短机器空闲时间和工件完成时间,这就是所谓的批量加工。采用批量加工能够加速生产流程,缩短交付周期,增加资源利用率,提高用户满意度。基于此,批量流水线调度已是许多实际生产调度的简化模型,具有广泛的工程应用背景。

批量流水线调度问题有时优化一个目标函数,有时优化多个相互冲突的目标函数;决策变量有时不需要满足额外的约束,有时需要满足一个或多个约束;调度问题的所有参数有时均为确定值,有时至少存在一个参数是不确定的。已有研究表明,含有约束的调度问题在多项式时间内不能得到问题的最优解。因此,研究不确定约束多目标批量流水线调度问题具有非常重要的理论意义和实际应用价值。

目前,诸多学者针对单目标批量流水线调度问题建立了数学模型,并提出了求解该问题的智能优化方法。然而,实际调度问题不仅需要优化单目标,还需要优化完工时间,提前完工时间,推迟完工时间、总流经时间和机器等待时间等多目标。因此,迫切需要研究多目标批量流水线调度问题,寻找 Pareto 最优解,为企业决策者提供更多更优的调度策略。

实际生产存在技术和成本等要求使机器间没有缓冲区以存储已完工的工件。例如,在药品制造过程中,对温度的要求比较高。为了保持高温,一个半成品加工完毕立即进入下一阶段。但是,如果下游机器忙碌,该药品只能被阻塞在当前机器上,造成了药品质量的下降。因此,需要设计高效的方法,最小化阻塞流水线调度问题的完工时间,这对于提高企业的生产效率是非常必要的。

除了上述多目标和约束条件外,生产调度中还存在多种不确定因素。例如,每一道生产工序中产品的处理时间、传输时间和中间存储单元的存储量等不确定,生产设备损坏、个人操作不当和用户需求改变等无法预料。这些不确定因素往往导致生产调度方案不能按照预定目标正常执行。因此,如何构建符合实际生



产的数学模型,减少不确定因素对生产效率带来的影响,将关系企业发展前景,需及早进行深入的研究。

鉴于此,作者近年来在主持的多项国家和省部级科研项目资助下,一直从事多目标流水线调度理论与优化方法的研究,给出多目标阻塞批量流水线调度问题数学模型,提出求解该问题的进化优化方法。当目标函数值为区间时,采用区间数的两个重要特征值,将多目标区间阻塞批量流水调度问题转化为传统的多目标阻塞批量流水线调度问题,并提出具有针对性的求解该问题的多目标优化方法。上述成果已经成功应用于批量流水线调度问题的基准测试算例,并通过与已有方法进行全面的比较,证实所提理论与方法的有效性。这些成果丰富了进化优化理论,提高了进化优化方法解决实际问题的能力,并拓展了进化优化方法的应用范围,因此具有重要的理论意义和实际应用价值。

本书是作者在该领域国内外权威期刊及有影响的国际会议论文集上发表十余篇学术论文的基础上,进一步加工、深化而成的,是对已有成果的全面总结和高度概括。主要内容包括构建多目标批量、多目标阻塞批量、加工时间不确定以及机器故障的多目标阻塞批量流水线调度问题的数学模型,提出相应的高效进化求解方法等。

本书在阐述进化优化的多目标批量流水线调度问题时,均给出问题研究的必要性、所提方法的思想、相关的技术措施,以及实现算法的具体步骤等。在阐述方法的应用时,均给出应用问题的背景、应用过程中所需参数的设置,以及详细的分析等。

本书在撰写过程中,得到聊城大学硕士生导师李俊青老师多方面的指导,提出许多非常中肯的意见和建议,在此表示衷心感谢。山东省博士基金(ZR2017BF039)、国家自然科学基金(61503170、61773192)以及聊城大学博士科研启动金为本书的出版提供大力支持,在此一并表示感谢。

多目标调度理论与方法是一个快速发展、多学科交叉的新颖研究方向,其理论及应用均有大量问题,尚待进一步深入研究。由于作者学识水平和可获得资料的限制,书中难免存在不妥之处,敬请同行专家和读者批评指正。

作者

2017年9月于聊城大学



# 目 录

《智能科学技术著作丛书》序

前言

第 1 章 基本知识 .....	1
1.1 调度问题基础知识 .....	1
1.1.1 基本概念 .....	1
1.1.2 流水线调度问题分类 .....	3
1.2 批量流水线调度问题研究现状 .....	8
1.2.1 单目标批量流水线调度问题 .....	9
1.2.2 多目标批量流水线调度问题 .....	10
1.3 加工时间不确定调度问题研究现状 .....	11
1.4 带机器故障调度问题研究现状 .....	14
1.5 基本 ABC 算法和 NSGA-II .....	17
1.5.1 基本 ABC 算法 .....	17
1.5.2 NSGA-II .....	19
1.6 本书主要内容 .....	22
1.7 本章小结 .....	24
参考文献 .....	24
第 2 章 阻塞流水线调度问题的进化求解 .....	35
2.1 研究背景 .....	35
2.2 阻塞流水线调度问题的数学模型 .....	36
2.3 融入差分进化的离散人工蜂群算法 .....	38
2.3.1 初始化种群 .....	39
2.3.2 差分进化 .....	40
2.3.3 自适应插入交换 .....	42
2.3.4 局部搜索 .....	44
2.4 算法描述 .....	45
2.5 实验 .....	46
2.5.1 实验设置 .....	46
2.5.2 参数 pmu、pc 和 pls 对 DE-ABC 算法的影响 .....	47
2.5.3 DE-ABC 算法与六种对比算法的 ARPD 值 .....	49

2.5.4	120 个算例的上界值 .....	52
2.5.5	DE-ABC 算法与对比算法的进化曲线 .....	57
2.5.6	非参数检验 .....	59
2.6	本章小结 .....	60
	参考文献 .....	60
<b>第 3 章</b>	<b>多目标批量流水线调度问题的进化求解 .....</b>	<b>62</b>
3.1	研究背景 .....	62
3.2	多目标批量流水线调度问题的数学模型 .....	63
3.3	INSGA-II .....	65
3.3.1	初始化种群 .....	66
3.3.2	子代产生方法 .....	67
3.3.3	重启策略 .....	71
3.4	算法描述 .....	72
3.5	实验 .....	74
3.5.1	实验设置 .....	74
3.5.2	参数 pc 对 INSGA-II 的影响 .....	75
3.5.3	初始化策略的性能分析 .....	76
3.5.4	变异算子的性能分析 .....	78
3.5.5	INSGA-II、NSGA-II、DHS 和 TA 算法的性能分析 .....	79
3.5.6	非参数检验 .....	84
3.6	本章小结 .....	84
	参考文献 .....	85
<b>第 4 章</b>	<b>多目标阻塞批量流水线调度问题的进化求解 .....</b>	<b>86</b>
4.1	研究背景 .....	86
4.2	多目标阻塞批量流水线调度问题的数学模型 .....	87
4.3	混合人工蜂群算法 .....	90
4.3.1	初始化种群 .....	90
4.3.2	个体产生方法 .....	93
4.3.3	观察蜂个体产生方法 .....	98
4.4	算法描述 .....	99
4.5	实验 .....	100
4.5.1	实验设置 .....	100
4.5.2	参数 pc 和 pls 对所提算法的影响 .....	102
4.5.3	初始化策略的性能分析 .....	104
4.5.4	交叉和变异算子性能分析 .....	105

4.5.5	pls 性能分析 .....	107
4.5.6	BBEDA、INSGA-II、NGA、TA 和 HDABC 算法性能分析 .....	109
4.6	本章小结 .....	113
	参考文献 .....	114
<b>第 5 章</b>	<b>多目标区间阻塞批量流水线调度问题的进化求解 .....</b>	<b>116</b>
5.1	研究背景 .....	117
5.2	多目标区间阻塞批量流水线调度问题的数学模型 .....	117
5.2.1	多目标区间阻塞批量流水线调度问题的描述 .....	117
5.2.2	多目标区间阻塞批量流水线调度问题的转化 .....	118
5.3	改进的 NSGA-II .....	120
5.3.1	初始化种群 .....	120
5.3.2	交叉算子 .....	123
5.3.3	基于理想点选择的局部搜索算法 .....	126
5.4	算法描述 .....	128
5.5	实验 .....	129
5.5.1	实验设置 .....	129
5.5.2	初始化策略的性能分析 .....	131
5.5.3	交叉算子的性能分析 .....	132
5.5.4	基于理想点选择的局部搜索的性能分析 .....	134
5.5.5	多目标区间阻塞批量流水线调度问题转化前后性能分析 .....	137
5.5.6	多目标区间阻塞批量流水线调度问题转化前后进化曲线 .....	140
5.5.7	与其他多目标算法的比较 .....	143
5.6	本章小结 .....	145
	参考文献 .....	145
<b>第 6 章</b>	<b>带机器故障的多目标阻塞批量流水线调度问题的进化求解 .....</b>	<b>147</b>
6.1	研究背景 .....	148
6.2	带机器故障的多目标阻塞批量流水线调度问题的数学模型 .....	148
6.3	融入重调度的 NSGA-II .....	151
6.3.1	第一阶段 .....	151
6.3.2	子代个体产生方法 .....	152
6.3.3	重调度策略 .....	153
6.4	算法描述 .....	156
6.5	实验 .....	157
6.5.1	实验设置 .....	157
6.5.2	初始化策略的性能分析 .....	158

---

6.5.3	交叉算子和变异算子性能分析 .....	158
6.5.4	RNSGA-II、DABC、INSGA 和 DHS 算法性能分析 .....	160
6.5.5	对比算法的进化曲线 .....	167
6.5.6	RNSGA-II 和 vNEH 启发式算法性能比较 .....	169
6.6	本章小结 .....	171
	参考文献 .....	172
<b>第 7 章</b>	<b>多目标有限缓冲区批量流水线调度实例 .....</b>	<b>173</b>
7.1	应用背景简介 .....	173
7.2	太阳能电池组件批量流水线调度 .....	174
7.3	应用实例 .....	177
7.4	本章小结 .....	181
	参考文献 .....	181
<b>第 8 章</b>	<b>本书结论 .....</b>	<b>182</b>
8.1	本书所做的工作 .....	182
8.2	本书创新点 .....	184
8.3	需要进一步研究的问题 .....	184

# 第 1 章 基本知识

调度研究的问题是将稀缺资源分配给在一定时间内的不同任务<sup>[1]</sup>。随着生产规模的不断扩大,调度和决策对企业管理和生产的重要性日渐凸显。调度问题是一个交叉性研究领域,它涉及运筹学、计算机科学、控制理论、工业工程等多个学科<sup>[2]</sup>。好的调度方案可极大提高企业的生产水平,合理利用资源,并提高市场竞争力。生产调度的研究主要可分为问题建模和调度算法设计两个方面<sup>[3]</sup>。

批量流水线调度问题是指,在加工过程中,每个工件可以分割为若干小批量,每个小批量加工之后,才能传送到下游的机器继续加工。通过这种加工方式,能够缩短工件的最大完工时间和机器空闲时间,加速生产流程,增加资源利用率,以及提高用户满意度。因此,该问题广泛应用于制造系统、装配线、信息服务设施、化学、纺织、塑料和半导体等工业生产中。

尽管已有多种求解批量流水线调度问题的智能优化方法,但是这些方法仅适用于确定的单目标批量调度问题,还无法用于求解多目标、多约束以及参数不确定的批量流水线调度问题。鉴于此,本书主要阐述多目标批量流水线调度理论与方法研究,特别是介绍作者在该方向取得的最新研究成果。为便于理解本书阐述的方法,需要首先介绍与之相关的知识。为此,本章将简要介绍调度问题的基础知识、批量流水线调度问题的研究现状、加工时间不确定调度问题的研究现状、带机器故障调度问题的研究现状,以及基本的人工蜂群(artificial bee colony, ABC)算法和非支配排序遗传算法 II(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II),并指出已有研究成果存在的不足。此外,本章最后概述本书的主要内容,使读者对本书的内容有个整体的认识。

## 1.1 调度问题基础知识

### 1.1.1 基本概念

车间调度问题是将稀缺资源分配给一定时间内的不同任务<sup>[1]</sup>,合理安排各项工作所占用的资源和交工次序等,最终使某个(多个)性能指标达到最优或近优状态<sup>[2]</sup>。该问题模型可描述为:有  $n$  个工件,按照一定的工艺流程,满足一定的约束条件,在  $m$  台机器上加工,每个工件都有若干道工序,工件的加工路径可以相同,也可以不同<sup>[3]</sup>。

车间调度问题按照加工约束条件或者系统复杂度,大致可分为5大类:单机调度问题(single machine scheduling problem, SMP)、流水线调度问题(flowshop scheduling problem, FSP)、作业调度问题(jobshop scheduling problem, JSP)、开放式调度问题(openshop scheduling problem, OPS)、并行机调度问题(parallel machines scheduling problem, PMP)。

### 1. 单机调度问题

单机调度问题描述为: $n$ 个工件在满足一定约束条件下,寻找一个调度序列,使得按照这一序列,在一台机器上加工的总成本最小<sup>[4]</sup>。从问题描述可以看出,单机调度实质上是对 $n$ 个工件进行全排序,总数为 $n!$ 。然后,从中找到一个最优调度序列。但是,当 $n=20$ 时, $20! \approx 2.4 \times 10^{18}$ 。这意味着,需计算 $2.4 \times 10^{18}$ 个排序的目标函数,计算量相当大。已有文献表明,当 $n$ 较大时,单机调度问题是一个NP难问题。目前,求解单机调度问题的优化算法有进化分配准则、离散差分进化算法和离散人工蜂群算法等<sup>[5-9]</sup>。

### 2. 流水线调度问题

流水线调度问题描述为<sup>[10]</sup>:有 $n$ 个工件,按照一定工艺流程,在 $m$ 台机器上加工,每个工件包含 $h$ 道工序,每道工序分配到不同的机器上加工,但 $n$ 个工件的 $h$ 道工序的加工路径是相同的,每道工序被指定在固定的机器上加工,不允许选择机器,并且加工顺序固定。流水线调度问题的任务是,确定工件的加工顺序,使得最大完工时间、流经时间、提前完工时间和推迟时间等某个(多个)指标最小。目前,求解该问题的优化方法有很多,如遗传算法、禁忌搜索算法、差分进化算法、和声搜索算法、粒子群算法、蚁群算法和人工蜂群算法等<sup>[11-29]</sup>。流水线调度问题是制造业生产领域中最常用的模型之一,也是目前学术界研究最多、最热的问题,具有很强的工程应用背景。

### 3. 作业调度问题

作业调度问题描述为<sup>[30]</sup>:有 $n$ 个工件,按照一定的工艺路线,在 $m$ 台机器上加工,每个工件包含 $h$ 道工序,每道工序分配到不同的机器上加工。如果各工序的加工机器是事先确定的,也就是说,每道工序被唯一指派到一台机器上加工,即 $h=m$ ,那么,机器是不能选择的,这类问题称为一般作业调度问题;如果各工序的加工机器是随机的,每道工序可以选择不同的机器加工,即 $h \neq m$ ,那么机器是可以选择的,这类问题称为柔性作业调度问题。与一般作业调度问题和柔性作业调度问题相比,各个工件的加工路径是独立的,因此后者更加复杂,是一类既满足任务配置,又满足顺序约束的资源分配问题,同样是一个NP难问题。目前求解该问

题的优化方法有遗传算法、禁忌搜索算法、邻域搜索算法、差分进化算法、文化基因算法、粒子群算法、蚁群算法和人工蜂群算法等<sup>[31-47]</sup>。

#### 4. 开放式调度问题

相对于作业调度问题,开放式调度问题具有更广阔的搜索空间。该问题描述如下<sup>[48]</sup>:有  $n$  个工件,在  $m$  台机器上加工,每个工件包含  $m$  道工序,每道工序均有确定的加工时间。在给定的时间内,每台机器只能加工一个工件,且每个工件只能由一台机器处理。同一台机器上工件的加工顺序任意,每个工件的工序处理顺序也无限制,在加工过程中,工序不允许中断。目前,针对该问题提出的算法有遗传算法、近似算法和多项式算法等<sup>[49-54]</sup>。

#### 5. 并行机调度问题

并行机调度问题描述为<sup>[55]</sup>:有  $n$  个工件,在  $m$  台机器上加工,每个工件仅需在某一台机器上加工一次,即待加工的工件都只有一道工序,可任意选择一台机器加工。并行机调度需要解决两个主要问题:①所有工件在各机器上的分配;②各机器上工件加工的次序。目前,针对该问题提出的算法有启发式算法、混合算法和禁忌搜索算法等<sup>[56-62]</sup>。

### 1.1.2 流水线调度问题分类

流水线调度研究  $n$  个工件在  $m$  台机器上的流水加工过程,根据约束条件的不同,大致有如下流水线调度问题:置换流水线调度问题(permutation flowshop scheduling problem)、零等待流水线调度问题(no-wait flowshop scheduling problem)、零空闲流水线调度问题(no-idle flowshop scheduling problem)、零缓冲区流水线调度问题(blocking flowshop scheduling problem)、有限缓冲区流水线调度问题(flowshop scheduling problem with limited buffers)、批量流水线调度问题(lot-streaming flowshop scheduling problem)、混合流水线调度问题(hybrid flowshop scheduling problem)。

#### 1. 置换流水线调度问题

置换流水线调度问题是最简单的流水线调度问题,该问题描述为<sup>[63,64]</sup>:有  $n$  个不同工件,按照相同工艺路线在  $m$  台机器上加工,要求每个工件必须无中断地在不同的机器上依次加工。其满足的约束条件是:机器之间存在无限缓冲区;一个工件最多只能在一台机器上加工;一台机器最多只能加工一个工件;工件加工时间是已知的;工件的准备时间或机器的开启时间都包含在加工时间内。该调度问题的目标是寻找一个调度序列,使得某项生产指标最优。常见的生产指标有最



大完工时间和总流经时间等。例 1.1 给出置换流水线调度问题的甘特图和相应指标的计算方法。

例 1.1 假设有 3 个工件  $\pi(1)$ 、 $\pi(2)$  和  $\pi(3)$ ，按照  $\pi(1)$ 、 $\pi(2)$  到  $\pi(3)$  的顺序，分别在 3 台机器上依次加工，其中，第一个工件在第一台机器上的开始时间为 0，其余工件在每台机器上的加工时间  $p_{j,i}$  为

$$p_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

图 1.1 中，makespan 是最大完工时间，其值等于最后一个工件在最后一台机器上的完工时间(makespan=9)。最小化最大完工时间，可以提高生产效率。

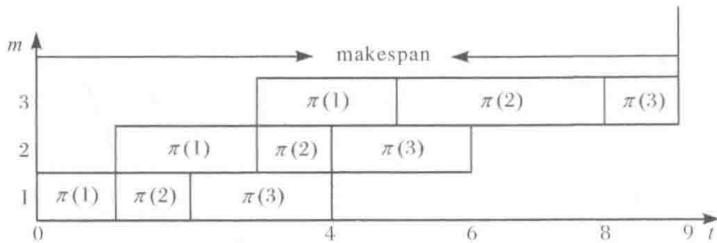


图 1.1 置换流水线调度最大完工时间的甘特图

$$\text{Total flow time} = T1 + T2 + T3$$

Total flow time 是总流经时间，其值等于每个工件在最后一台机器上完工时间的总和，即图 1.2 中，Total flow time =  $T1 + T2 + T3 = 22$ 。最小化总流经时间，可以均衡地利用生产资源，减小在线库存<sup>[65]</sup>。

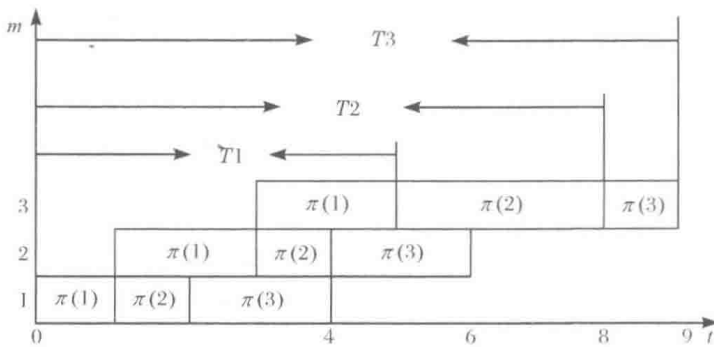


图 1.2 置换流水线调度总流经时间的甘特图

## 2. 零等待流水线调度问题

与置换流水线调度问题相比，零等待流水线调度问题要求同一个工件的各工

序必须连续完工,即两个工序之间不允许有等待时间;而前者允许工件在不同机器之间有等待时间<sup>[66-68]</sup>。同样,采用例 1.1 方法,图 1.3 给出零等待流水线调度问题的甘特图。

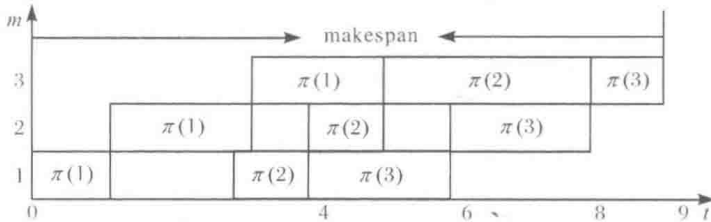


图 1.3 零等待流水线调度最大完工时间的甘特图

如图 1.3 所示,零等待流水线调度问题要求同一个工件的两个工序之间不允许有等待时间,当第一台机器加工完  $\pi(1)$  时,若  $\pi(2)$  立即开工,如图 1.1 所示,则工件  $\pi(2)$  在第二台机器上开始与在第一台机器上完工之间存在等待时间,因此对于零等待流水线调度问题,工件  $\pi(2)$  不能立即被加工。为了满足零等待条件,  $\pi(2)$  在第一台机器上的开始时间有所滞后,与此同时,  $\pi(2)$  和  $\pi(3)$  在第二台机器的开始时间也有所滞后。

### 3. 零空闲流水线调度问题

除了满足上述置换流水线调度问题的约束条件外,零空闲流水线调度问题还需满足同一台机器上的所有工件必须连续完成,即相邻两个工件之间没有等待时间<sup>[69-72]</sup>。采用例 1.2(图 1.4)给出零空闲流水线调度问题的甘特图。

**例 1.2** 假设有 3 个工件  $\pi(1)$ 、 $\pi(2)$  和  $\pi(3)$ ,按照从  $\pi(1)$ 、 $\pi(2)$  到  $\pi(3)$  的顺序,分别在 3 台机器上依次加工,其中,第一个工件在第一台机器上的开始时间为 0,其余工件在每台机器上的加工时间  $p_{j,t}$  为

$$p_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

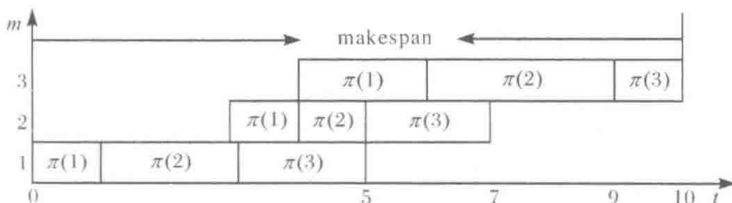


图 1.4 零空闲流水线调度最大完工时间的甘特图

如图 1.4 所示,零空闲流水线调度问题要求两个工件之间不允许有等待时