

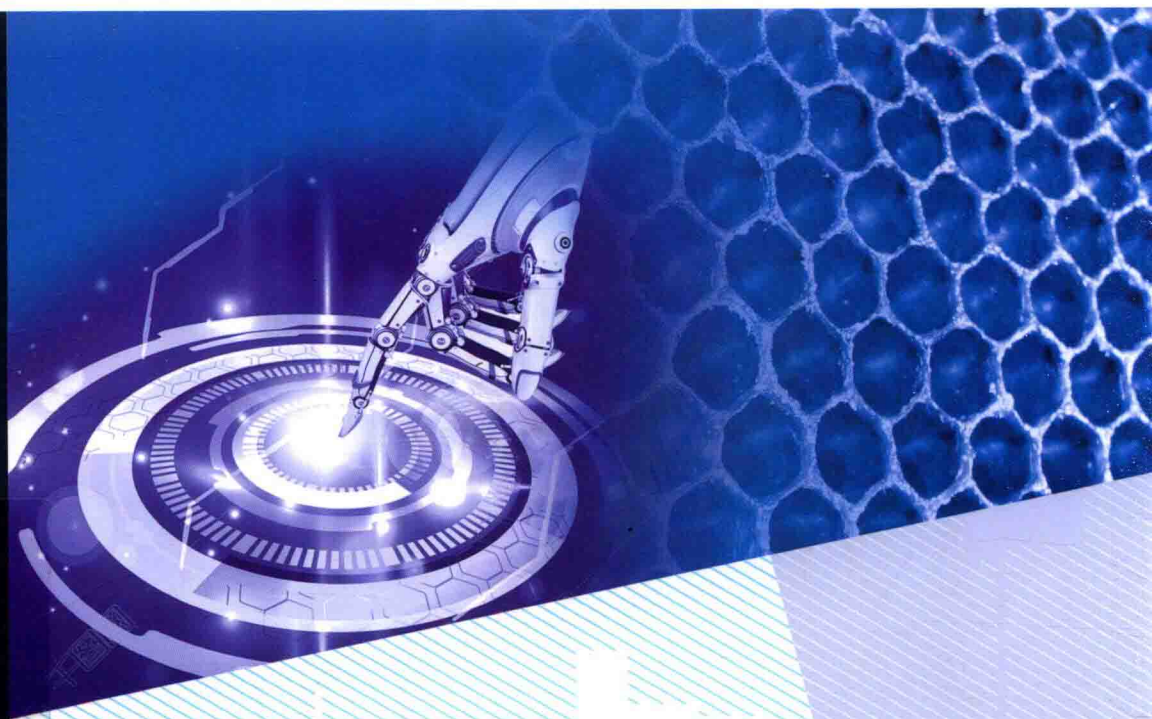


智能

科/学/技/术/著/作/丛/书

钢铁生产调度及其 人工蜂群算法研究

李俊青 潘全科 刘 闯 著



非
外
借



科学出版社

智能科学技术著作丛书

钢铁生产调度及其 人工蜂群算法研究

李俊青 潘全科 刘 闯 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

钢铁行业是我国国民经济的重要支柱产业,高效的优化方法对于钢铁企业生产调度有着重要的现实意义。混合流水车间调度问题是钢铁生产过程中的一种典型调度问题。本书针对炼铁、炼钢-连铸、热轧等生产环节的混合流水车间调度问题,分别建立了混合整数规划模型,研究了问题的先验知识和结构特性,探索了人工蜂群优化解决调度问题的关键理论与技术,提出了一系列具有创新性的优化调度理论,并设计了多种高效的调度方法。本书是作者近几年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。

本书可供高等院校自动化、计算机等相关专业的教师及研究生阅读,也可供自然科学和工程技术领域的研究人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢铁生产调度及其人工蜂群算法研究/李俊青,潘全科,刘闯著. —北京:科学出版社,2017. 11

(智能科学技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-055146-7

I. ①钢… II. ①李… ②潘… ③刘… III. ①钢铁工业-生产调度-计算机算法-研究-中国 IV. ①F426. 316. 2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 269378 号

责任编辑:张海娜 姚庆爽 / 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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 11 月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:240 000

定价:80.00 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、新产品的发展方向和显著标志。

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

钢铁行业是国民经济的支柱产业,其生产过程的优化对于企业有着重要的现实意义,可以有效降低能耗、提高设备利用率、减少工序提前/滞后加工的成本、提高企业生产效率,进而对国民经济产生深远影响。钢铁生产包含炼铁、炼钢-连铸和热轧三个主要生产过程,每个生产过程又包含多个加工阶段,每个加工阶段都需要使用多种并行加工设备。因而,可以把钢铁生产的主要过程看做包含多种约束条件的混合流水车间调度(HFS)问题。

钢铁生产中存在大量混合流水调度优化问题,这些优化问题直接影响钢铁生产企业的生产效率,提高优化质量有利于企业提高经济效益和社会效益。目前,研究钢铁企业生产调度的文献或者对生产环节中某个加工阶段中的 HFS 问题开展研究,或者缺乏对实际生产约束条件的考虑,或者由于算法所限不能解决大规模生产调度问题。近年来,人工蜂群算法得到了广泛研究,并在连续优化和调度优化中表现了良好性能,一些局部搜索算法,如禁忌搜索算法、迭代贪心算法等进一步提高了算法搜索能力。综合当前算法研究现状可知,上述群体智能优化算法或局部搜索算法或者应用于求解经典的 HFS 问题而不能考虑实际生产约束,或者只考虑算法本身的改进而不能直接应用于求解钢铁企业生产调度问题。

本书针对炼铁、炼钢-连铸、热轧等生产环节的 HFS 问题,分别建立混合整数规划模型,研究问题的先验知识和结构特性,探索人工蜂群优化算法解决调度问题的关键理论与技术,提出一系列具有创新性的优化调度理论,并设计多种高效的调度方法。

本书是作者多年来针对相关问题的研究成果,也是对国家自然科学基金资助项目的总结和应用。本书的研究内容吸收了作者近几年的论文成果。需要指出的是,本书反映了课题组的阶段性研究成果,作为研究对象的钢铁生产调度问题十分复杂,且约束条件和优化目标处于不断变化之中,因此本书不足之处在所难免。

感谢国家自然科学基金支持,感谢东北大学、聊城大学的师生为本书提供的素材和宝贵的资料。感谢桑红燕、韩玉艳、王存刚、亓民勇等老师,以及王永、宁尚彬、位通、陈庆达、张彪等研究生承担了本书初稿的文字整理、修改等工作。

李俊青

2017 年 4 月

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 混合流水车间调度问题	1
1.1.1 HFS 问题建模	2
1.1.2 HFS 问题复杂性分析	4
1.1.3 关键路径	4
1.2 优化算法	6
1.2.1 基本人工蜂群算法	6
1.2.2 迭代贪心算法的研究	9
1.2.3 禁忌搜索算法的研究	10
1.2.4 现有方法中存在的问题	12
参考文献	13
第 2 章 经典混合流水车间调度优化方法	22
2.1 HFS 问题研究现状	22
2.1.1 经典 HFS 问题研究现状	22
2.1.2 多约束 HFS 问题研究	23
2.2 经典 HFS 问题算法研究	24
2.2.1 问题编码	24
2.2.2 初始解集的建立	25
2.2.3 邻域结构	25
2.2.4 局部搜索策略	26
2.2.5 雇佣蜂策略	26
2.2.6 跟随蜂策略	26
2.2.7 侦查蜂策略	27
2.2.8 结合人工蜂群和迭代贪心的混合离散算法	27
2.3 实验分析	28
2.3.1 实验设置	28
2.3.2 同型并行机实验结果分析	28
2.3.3 异构并行机实验结果分析	33
2.4 本章小结	33

参考文献	34
第3章 铁水运输调度优化方法	39
3.1 带动态工序跳跃约束的铁水运输调度问题的研究现状	40
3.2 铁水运输调度 HFS 问题描述	41
3.3 铁水运输调度 HFS 问题建模	42
3.3.1 问题特征	42
3.3.2 变量和下标	43
3.3.3 数学模型	44
3.3.4 铁水运输调度问题实例	44
3.4 铁水运输调度 HFS 问题算法研究	46
3.4.1 动态编码策略	46
3.4.2 柔性解码策略	48
3.4.3 右移策略	49
3.4.4 邻域结构	52
3.4.5 强化局部搜索策略	53
3.4.6 算法框架	53
3.4.7 DABC 算法收敛性分析	54
3.5 实验比较与分析	55
3.5.1 实验设置	55
3.5.2 实验算例	55
3.5.3 实验参数	56
3.5.4 动态编码策略的有效性	56
3.5.5 解码策略的有效性	58
3.5.6 右移策略的有效性	59
3.5.7 跳跃邻域结构的有效性	59
3.5.8 与现有算法的比较	60
3.6 本章小结	64
参考文献	64
第4章 炼钢-连铸调度优化方法	68
4.1 带设备维修约束的炼钢-连铸 HFS 问题的研究现状	68
4.2 炼钢-连铸 HFS 问题描述	69
4.3 炼钢-连铸中 HFS 问题建模	70
4.3.1 问题假设	70
4.3.2 变量和下标	71

4.3.3 数学模型	72
4.4 炼钢-连铸中 HFS 问题的算法研究	73
4.4.1 问题编码	73
4.4.2 考虑设备维修时间约束的解码策略	74
4.4.3 邻域结构	78
4.4.4 自适应邻域选择机制	79
4.4.5 解集初始化	80
4.4.6 雇佣蜂策略	80
4.4.7 侦查蜂策略	80
4.4.8 全局搜索过程	80
4.4.9 算法框架	81
4.4.10 算法收敛性分析	81
4.5 实验比较与分析	82
4.5.1 实验设置	82
4.5.2 实验算例	82
4.5.3 实验参数	83
4.5.4 不考虑设备维修约束实验分析	84
4.5.5 带设备维修约束实验分析	88
4.6 本章小结	90
参考文献	90
第 5 章 热轧调度优化方法	92
5.1 有限缓冲区热轧调度问题的研究现状	92
5.2 有限缓冲区约束 HFS 问题描述	93
5.3 有限缓冲区约束的混合算法研究	94
5.3.1 基于 TS 的自适应邻域结构	94
5.3.2 基于 TS 的局部搜索策略	95
5.3.3 编码	97
5.3.4 考虑有限缓冲区约束的解码策略	98
5.3.5 雇佣蜂策略	100
5.3.6 跟随蜂策略	101
5.3.7 侦查蜂策略	101
5.3.8 算法框架	101
5.3.9 算法收敛性分析	101
5.4 实验分析	102
5.4.1 实验设置	102

5.4.2 实验算例	102
5.4.3 实验参数	103
5.4.4 自适应邻域结构性能分析	104
5.4.5 与其他算法对比分析	106
5.5 本章小结	111
参考文献	112
第6章 炼钢-连铸重调度优化方法	115
6.1 炼钢-连铸重调度问题的研究现状	115
6.2 炼钢-连铸重调度问题建模	116
6.2.1 问题特征	116
6.2.2 变量与下标	117
6.2.3 数学模型	118
6.3 炼钢-连铸重调度问题复杂度分析	119
6.4 炼钢-连铸重调度问题相关策略	120
6.4.1 启发式规则	120
6.4.2 工件分组	120
6.4.3 加工时间延迟策略	121
6.4.4 断浇消除策略	122
6.4.5 右移策略	124
6.5 炼钢-连铸重调度算法研究	126
6.5.1 编码策略	126
6.5.2 解码策略	127
6.5.3 邻域结构	129
6.5.4 解集初始化	130
6.5.5 算法流程	130
6.5.6 基于 IG 的局部搜索过程	132
6.5.7 算法收敛性分析	132
6.6 实验分析	132
6.6.1 实验设置	132
6.6.2 实验算例	133
6.6.3 实验参数	134
6.6.4 启发式规则的有效性	135
6.6.5 邻域结构的有效性	136
6.6.6 基于 IG 的局部搜索过程的有效性	139
6.6.7 与 GA 和 TS 的比较	140

6.6.8 与其他算法的比较	143
6.7 本章小结	146
参考文献	147
第7章 工业应用实例分析	150
7.1 铁水运输 HFS 问题实例分析	150
7.2 炼钢-连铸 HFS 问题实例分析	156
7.3 热轧过程 HFS 问题实例分析	160
7.4 炼钢-连铸重调度实例分析	162
参考文献	167
结束语	168
附录 机组标准测试实例数据	171

第1章 基本知识

钢铁行业是国民经济的支柱产业,其生产过程的优化对于企业有着重要的现实意义,可以有效降低能耗、提高设备利用率、减少工序提前/滞后加工的成本,提高企业生产效率,进而对国民经济产生深远影响。钢铁生产包含炼铁、炼钢-连铸和热轧三个主要生产过程,每个生产过程又包含多个加工阶段,每个加工阶段都需要使用多种并行加工设备。因而,可以把钢铁生产的主要过程看做包含多种约束条件的混合流水车间调度(hybrid flowshop scheduling, HFS)问题。

为便于理解本书阐述的问题和方法,首先需要介绍相关的基本知识。为此,本章将简要介绍 HFS 问题和优化方法的基本知识。

1.1 混合流水车间调度问题

经典 HFS 问题属于 NP 难问题,目标的搜索涉及解空间的组合爆炸,因而传统的精确求解算法难以应用于较大规模 HFS 问题的求解过程^[12-18]。由于增加了特定的实际生产约束,实际钢铁生产过程存在的多约束 HFS 问题变得更为复杂,因而相比传统的 HFS 问题难度更大^[1-11]。同时,多约束 HFS 问题具有良好的结构特征,智能优化算法可以有效利用这些约束特征、目标特点和问题结构特征,有助于设计出为实际钢铁生产中 HFS 问题求解的算法框架。

钢铁生产总流程如图 1-1 所示。其中,炼铁生产过程包括高炉生产、前扒渣处理、脱硫/脱磷处理、后扒渣处理、倒罐五个加工工序^[19]。铁水分为普通铁水和特殊类型铁水两种,特殊类型铁水必须经过全部加工阶段,而普通铁水则需要根据前扒渣和后扒渣加工阶段中加工设备的处理能力动态选择是否跳跃这两个加工阶段。炼钢-连铸加工过程包括炼钢、精炼、连铸三道工序^[11]。在连铸阶段,各个浇次的炉次必须连续加工。热轧过程是将连铸机产出的板坯加工为形状和规格符合特定要求的产品,一般为钢卷。在进行热轧加工之前,绝大多数板坯需要在加热炉中加热到一定温度才能进行后续加工。因而,热轧过程中保温要求比较高,如何降低热轧过程中的能耗成为企业提高竞争力的关键环节^[20]。另外,炼钢-连铸是钢铁生产的核心,也是影响整个生产过程的关键环节,因而研究动态生产环境下的炼钢-连铸重调度问题具有重要的理论和实践价值。

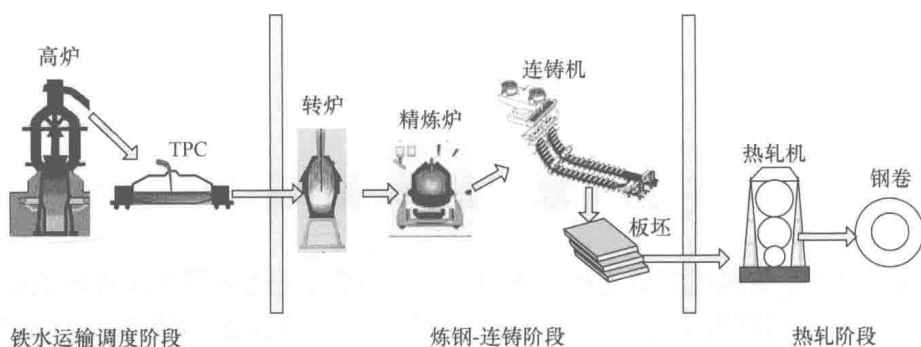


图 1-1 钢铁生产总流程示意图

综上所述,研究钢铁生产中 HFS 问题具有重要的现实意义。本书将针对静态生产环境下的铁水运输调度、炼钢-连铸、热轧等生产环节中存在的 HFS 问题,以及动态生产环境下的炼钢-连铸重调度问题,采用人工蜂群算法(artificial bee colony algorithm, ABC 算法)开展研究。

1.1.1 HFS 问题建模

经典 HFS 问题描述如下:假设有 m 个加工中心,每个加工中心有 m_k 个并行加工机床,有 n 个工件,每个工件包含 m 个加工工序 O_{jk} , O_{jk} 在加工中心 k 的 m_k 个并行加工机床中选择唯一一个可用机床进行加工。HFS 问题下标及变量含义如下:

j : 工件下标($j=1, 2, \dots, n$)。

k : 加工阶段下标($k=1, 2, \dots, m$)。

$m_k \geq 1$ 表示第 k 个加工中心并行机床的数量。

i : 机床下标($i=1, 2, \dots, m_k$)。

$M=\{1, 2, \dots, m\}$ 表示 m 个加工中心或阶段。

$J=\{1, 2, \dots, n\}$ 表示 n 个加工工件。

O_{jk} 表示工件 j 在加工中心 k 的工序。

$p_{jk} \geq 0$ ($j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, m$) 表示工件 j 在加工中心 k 的加工时间。

每个加工机床在同一时间内只能加工一个工件;每个工件在同一时间内只能选择一个加工机床。

$S_{j,k} \geq 0$ ($j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, m$) 表示工序 O_{jk} 在第 k 个加工中心的开工时间,其满足如下两个条件:

① $S_{j,k} \geq S_{j,k-1} + p_{j,k-1}, j=1, 2, \dots, n, k=2, 3, \dots, m;$

② $S_{\pi_{ki}(s),k} \geq S_{\pi_{ki}(s-1),k} + p_{\pi_{ki}(s-1),k}, s=2, 3, \dots, n_{ki}, k=1, 2, \dots, m, i=1, 2, \dots, m_k。$

其中,条件①是工件加工顺序约束;条件②表示机床加工顺序约束。

$C_{j,k} \geq 0 (j=1,2,\dots,n, k=1,2,\dots,m)$ 表示工序 O_{jk} 在第 k 个加工中心的完工时间。

J_{ki} 表示分配给加工中心 k 的第 i 个机床的工件集合。

$J_k = \{J_{k1}, J_{k2}, \dots, J_{km_k}\} (J_{ki_1} \cap J_{ki_2} = \emptyset, i_1 \neq i_2, i_1, i_2 = 1, 2, \dots, m_k)$ 表示分配给加工中心 k 的工件集合。

$J = \bigcup_{i=1}^{m_k} J_{ki}$ 表示所有加工工件的集合。

$\pi_{ki} = (\pi_{ki}(1), \pi_{ki}(2), \dots, \pi_{ki}(n_{ki}))$ 表示分配到加工中心 k 的第 i 个机床进行加工的工件的一个排列, 其中 $n_{ki} = |J_{ki}|$ 。

$\pi_k = (\pi_{k1}, \pi_{k2}, \dots, \pi_{km_k})$ 表示加工中心 k 的所有工件排列; $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m)$ 则表示全部工件的排列。

π 也包含了机床分配信息, 因为 $J_k = \{J_{k1}, J_{k2}, \dots, J_{km_k}\}$, 其中 J_{k1} 表示分配到加工中心 k 的第 1 个机床的工件集合, 以此类推, J_{km_k} 表示分配到加工中心 k 的第 m_k 个机床的工件集合。

x_{ijk} 为 0/1 变量, 在加工阶段 i , 如果工件 j 选择机床 k 进行加工, 则 $x_{ijk} = 1$; 否则, $x_{ijk} = 0$ 。

y_{ijhk} 为 0/1 变量, 在加工阶段 i , 如果工件 j 和 h 在同一个机床上加工, 并且 j 是 h 的紧前工件, 则 $y_{ijhk} = 1$; 否则, $y_{ijhk} = 0$ 。

$C_{\max}(\pi^*) = \min_{\pi \in II} C_{\max}(\pi)$ 表示最小的完工时间, 其中, $C_{\max}(\pi) = \max_{1 \leq j \leq n} (S_{j,m} + p_{j,m})$ 表示排列 π 的最大完工时间, II 表示所有排列的集合。

$II = \{\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) : \pi_k = (\pi_{k1}, \pi_{k2}, \dots, \pi_{km_k}), (\pi_{ki} \in P(J_{ki}), i \in M_k)\}$, 其中 $P(X)$ 表示集合 X 的所有排列序列集合。

$$C_{\pi_{ki}(j),k} = \max\{C_{\pi_{ki}(j),k-1}, C_{\pi_{ki}(j-1),k}\} + p_{\pi_{ki}(j),k}$$

其中, $j=1,2,\dots,n; k=1,2,\dots,m; i=1,2,\dots,m_k$ 。

有了上述符号, HFS 问题的模型建立如下:

$$\min C_{\max} = \max_{1 \leq j \leq n} C_{j,m} \quad (1.1)$$

s. t.

$$S_{j,k} \geq S_{j,k-1} + p_{j,k-1}, \quad j=1,2,\dots,n, \quad k=2,3,\dots,m \quad (1.2)$$

$$S_{\pi_{ki}(s),k} \geq S_{\pi_{ki}(s-1),k} + p_{\pi_{ki}(s-1),k}, \quad s=2,3,\dots,n_{ki}, \quad k=1,2,\dots,m, \\ i=1,2,\dots,m_k \quad (1.3)$$

$$S_{j,k} \geq 0, \quad j=1,2,\dots,n, \quad k=1,2,\dots,m \quad (1.4)$$

$$C_{j,k} \geq 0, \quad j=1,2,\dots,n, \quad k=1,2,\dots,m \quad (1.5)$$

$$p_{jk} \geq 0, \quad j=1,2,\dots,n, \quad k=1,2,\dots,m \quad (1.6)$$

其中, 不等式约束(1.2)描述属于同一工件的工序间的先后约束关系, 不等式约束

(1.3)限制同一个机床上有紧前关系的工件间不允许出现加工时间重叠,不等式约束(1.4)~约束(1.6)限定了变量的取值范围。

1.1.2 HFS 问题复杂性分析

HFS 问题是经典流水线调度问题(FSP)的特例。对于带有两个加工中心,每个加工中心只有一台加工机床的 FSP($F_2(1,1)/C_{\max}$),文献[21]证明其时间复杂度为 $O(n \log n)$,其中 n 为工件数目。Garey 和 Johnson^[21]证明最小化 makespan 目标的 HFS 问题是 NP-C(NP-complete)问题。Tran^[22]证明,对于包含两个加工中心,第二个加工中心的机床有指定分配(dedicated machines)约束的 HFS 问题($F_2(P_{k=1}^2)/\text{prmt}/C_{\max}$),是一个一元 NP-C 问题。Yang^[23]证明第一个加工中心包含机床指派约束,最小化总流经时间为目标的两阶段 HFS 问题($F_2(P2d,1)/\sum C_j$)是 NP 难问题。

针对 m 个加工中心的 HFS 问题,Quadt 和 Kuhn^[24]证明带有批加工(batch)、工件跳跃的 HFS 问题($F_m, P_{k=1}^m/\text{skip}, \text{batch}/\bar{F}, \text{cost}$)是 NP 难问题。Ruiz 等^[25]证明包含机床可用约束(machine availability)和工件跳跃(job skipping)约束的混合柔性流水线问题(hybrid flexible flow line problem, HFFL) ($F_m, P_{k=1}^m/\text{skip}, \text{rm}, \text{lag}, S_{sl}, M_j, \text{prec}/C_{\max}$)是一个 NP 难问题。文献[26]证明最小化滞后惩罚(tardiness)目标的 HFS 问题($F_m, P_{k=1}^m/\text{skip}/\bar{T}$)是一个 NP 难问题。文献[27]针对带有多处理器加工的 HFS 问题 $F_m, P_{k=1}^m/\text{size}_{ij}/C_{\max}$,其中, $F_m, P_{k=1}^m$ 表示并行机器加工环境, size_{ij} 表示多处理器加工特性, $C_{\max}$ 表示最小化 makespan 目标,证明其是一个强 NP 难问题。Naderi 等^[28]证明带有序列相关启动时间约束,以最小化平均流经时间(flow time)和平均推迟时间(tardiness)的多阶段 HFS 问题($F_m, P_{k=1}^m/S_{sl}/\bar{F}, \bar{T}$)是 NP 难问题。Tavakkoli-Moghaddam 等^[29]证明带有加工阻塞(block)、工件跳跃的 HFS 问题($F_m, P_{k=1}^m/\text{skip}, \text{block}, \text{reentry}/C_{\max}$)是 NP 难问题。Jungwat-tanakit 等^[30]证明带有启动时间约束,最小化 makespan 和交货日期惩罚的 HFS($F_m, P_{k=1}^m/S_{sl}, r_j/\alpha C_{\max} + (1-\alpha)\bar{U}$)是 NP 难问题。文献[31]证明带有有限缓冲区的 HFS 问题($F_m, P_{(k=1)}^m/\text{buffer}/\bar{F}$)是 NP 难问题。

1.1.3 关键路径

1. 关键路径描述

析取图是描述调度问题的一种常用方式^[12],对于析取图 $G_\pi = (N, T \cup E(\pi))$,其中 $N = J \times M$ 表示节点集合, $T \cup E(\pi)$ 表示连线集合:

$$T = \bigcup_{j=1}^n \bigcup_{k=2}^m \{(j, k-1), (j, k)\} \quad (1.7)$$

$$E(\pi) = \bigcup_{k=1}^m \bigcup_{i=1}^{m_k} \bigcup_{j=1}^{n_{ki}} \{(\pi_{ki}(j-1), k), (\pi_{ki}(j), k)\} \quad (1.8)$$

其中, $(j, k) \in N$, 权重为 $p_{j,k}$ 。 T 中的连线表示工件工序之间的加工次序关系, $E(\pi)$ 中的连线表示同一加工机床上的工序加工次序关系。

关键路径定义为析取图中最长的路径^[12,32], 如图 1-2 所示, 关键路径为 $\{\{O_{11}, O_{21}, O_{31}\}, \{O_{32}\}, \{O_{33}\}\}$ 。关键块 block 表示在关键路径上, 处于同一个加工机床连续加工的工序子序列。如图 1-2 所示, 在第一个加工中心的 M_1 机床上, 工序 O_{11}, O_{21} 和 O_{31} 构成了一个加工关键块。上例中, 关键路径包含三个关键块, 分别是 $\{O_{11}, O_{21}, O_{31}\}, \{O_{32}\}, \{O_{33}\}$ 。图 1-3 给出了对应图 1-2 给定的甘特图的析取图表示, 图中灰色填充的工序表示关键工序, 虚线表示工件工序之间的加工次序关系, 实线表示同一加工机床上的工序加工次序关系。

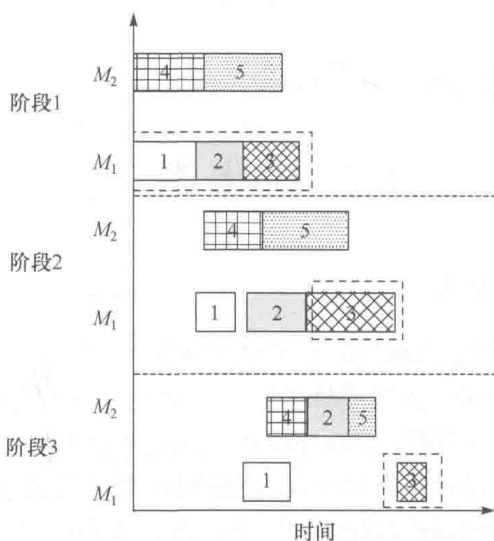


图 1-2 甘特图实例

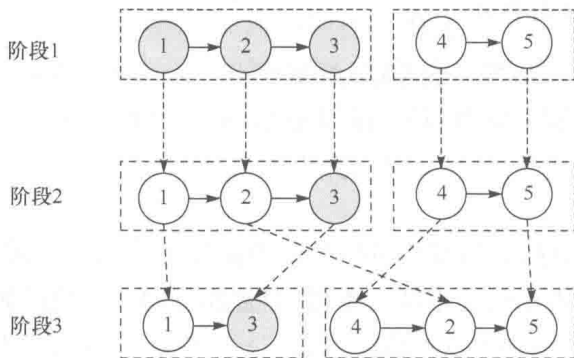


图 1-3 甘特图实例析取图