

现代制造系统 智能调度技术 及其应用

雷德明 著

XIANDAI ZHIZAO XITONG

ZHINENG DIAODU JISHU

JIQI YINGYONG



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

现代制造系统 智能调度技术 及其应用

雷德明 著

XIANDAI ZHIZAO XITONG

ZHINENG DIAODU JISHU

JIQI YINGYONG



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

生产调度是钢铁、化工和半导体等诸多复杂现代制造系统的重要环节,是实施计算机集成制造系统的关键。在过去的 20 多年里,智能优化算法如遗传算法、粒子群优化和模拟退火等在生产调度方面的应用十分广泛,智能生产调度技术日益全面和深入。本书系统介绍了现代制造系统智能调度技术的最新研究进展,总结智能算法对多种类型调度问题的应用成果。全书共分 8 章,主要内容包括不确定车间调度、柔性调度、机器可用约束调度、批处理机调度和可重入调度、多目标智能调度以及智能调度技术在实际制造过程中的应用等。

本书内容取材内容新颖,系统深入,注重理论联系实际。本书可作为控制理论与控制工程、管理科学与工程、工业工程和系统工程等专业研究生的教材,也可以作为从事生产调度研究的相关人员和生产管理人员的学习、参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代制造系统智能调度技术及其应用/雷德明著. —北京:
中国电力出版社, 2010. 12

ISBN 978 - 7 - 5123 - 1239 - 5

I. ①现… II. ①雷… III. ①计算机集成制造-调度
IV. ①TH166

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 253985 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 6 月第一版 2011 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 424 千字

印数 0001—3000 册 定价 38.00 元



敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前 言

随着信息技术、先进制造技术和全球化的发展，制造业的发展技术和模式发生了较大的变化，随着绿色制造、计算机集成制造、智能制造、网络制造和敏捷制造等新技术的发展，出现了现代制造技术和现代制造系统，它们综合了机械、计算机、电子信息、材料、自动化、设计与工艺一体化等技术，其主要特点是信息技术、管理科学和制造科学的交叉融合，并朝着精密化、柔性化、集成化、绿色化和全球化等方向发展。

生产调度是钢铁、化工和半导体等诸多复杂现代制造系统的重要环节，是实施计算机集成制造系统的关键。利用合理的调度方案，将提高设备利用率，减少能耗和物耗，降低库存和成本，从而提高生产系统的操作最优性，为企业带来显著的经济效益，提高市场竞争力。生产调度具有诸多复杂性，如多目标、不确定、大规模、多极小、强约束和 NP 难等特点，受到学术界和工业界的广泛关注。

智能优化算法是一类通过模拟某一自然现象或过程而建立起来的优化方法，这类算法包括进化算法、遗传算法（GA）、粒子群优化（PSO）、禁忌搜索、模拟退火（SA）、蚁群算法和差分进化等，并有新的算法不断涌现。与传统的数学规划相比，智能算法具有较强的全局优化能力，适合于求解规模较大的复杂优化问题，获得问题的满意解。自 1985 年以来，智能算法在制造系统调度方面的应用非常广泛，制造过程智能调度理论、方法和应用研究取得了相当大的进展。

本书力图总结作者和国内外同行在现代制造系统智能调度理论与应用方面所取得的一系列研究成果，主要讨论不确定生产调度、柔性调度、机器可用约束调度、批处理机调度和可重入调度、多目标智能调度以及智能调度技术在实际生产制造中的应用。全书共 7 章。第 1 章为绪论，简要介绍了智能生产调度的基本理论，包括调度问题分类、典型调度问题描述、智能调度方法分类以及几种智能算法的简要描述。第 2 章是本书的重点内容之一，主要介绍模糊调度和随机调度的理论与技术，主要包括不确定性类型的描述以及多种智能算法，如随机键遗传算法和群体邻域搜索（SNS）等算法对两类不确定调度的应用。第 3 章介绍柔性调度理论与技术，主要包括柔性流水车间调度、柔性作业车间调度，以及模糊环境下的柔性调度，重点介绍了求解模糊柔性调度问题的分解集成遗传算法和 SNS。第 4 章关于机器可用约束调度，首先简单描述机器不可用的原因；然后分别介绍了具有维修操作的多种调度问题，如流水车间调度、柔性作业车间调度和模糊调度；最后介绍了具有随机故障的调度问题的求解方法。第 5 章关于批处理机调度和可重入调度，主要介绍 SA、GA 和变邻域搜索等对多种批处理机问题的应用。第 6 章为多目标智能调度，主要描述了基于 GA、PSO 和禁忌搜索等的调度算法以解决流水车间调度、作业车间调度、柔性调度、模糊调度、随机调度和批处

理机调度等，并对未来研究进行了展望。第7章主要描述了几种智能调度技术在流程工业和半导体晶圆制造方面的应用。

本书涉及作者的研究成果是在国家自然科学基金“产能约束下集成电路芯片多阶段测试系统优化调度的模型和方法研究”(70901064)和湖北省自然科学基金(2007ABA332)等项目资助下取得的。本书由武汉理工大学雷德明副教授和西南交通大学郭秀萍副教授共同完成，其中郭秀萍副教授完成第3章第1~3节和第5章的第1~3节和第5节，其余章节由雷德明副教授完成。

本书内容取材新颖，系统深入，注重理论联系实际，可作为控制理论与控制工程、管理科学与工程、工业工程和系统工程等专业研究生教材，也可以作为相关研究人员和生产管理人员的学习、参考书。

由于作者水平有限，不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

雷德明

deminglei11@163.com

2010年10月于武汉理工大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 制造过程调度问题	1
1.1.1 调度问题分类	1
1.1.2 调度问题特性描述	2
1.1.3 典型调度问题描述	5
1.1.4 调度问题的复杂性	10
1.2 智能调度方法分类与智能优化算法	10
1.2.1 智能调度方法分类	10
1.2.2 启发式方法	11
1.2.3 遗传算法	12
1.2.4 禁忌搜索	18
1.2.5 粒子群算法	19
1.2.6 模拟退火算法	20
1.3 本书主要内容	21
第 2 章 不确定车间调度	24
2.1 引言	24
2.2 模糊调度理论	25
2.2.1 模糊数	25
2.2.2 三角模糊数运算	26
2.2.3 梯形模糊数运算	29
2.2.4 模糊交货期	29
2.3 模糊车间调度	30
2.3.1 概述	30
2.3.2 基于 GPSO 的 FJSSP	31
2.3.3 基于 RKGA 的 FJSSP	33
2.3.4 基于群体邻域搜索 (SNS) 的 FJSSP	40
2.4 模糊批量调度	43
2.5 随机流水车间调度	48

2.5.1	随机性与随机调度	48
2.5.2	随机目标计算方法	49
2.5.3	SFSSP 的启发式算法	51
2.6	随机作业车间调度	53
2.6.1	随机序与随机时间	53
2.6.2	基于 OPGA 的 SJSSP	55
2.6.3	基于 RKGA 的 SJSSP	61
2.7	结论与展望	64
第 3 章	柔性调度	66
3.1	引言	66
3.2	柔性流水车间调度	67
3.2.1	问题描述	68
3.2.2	问题求解	69
3.2.3	算法测试和结果分析	72
3.3	柔性作业车间调度	76
3.3.1	问题描述	77
3.3.2	问题求解: 并行变邻域搜索算法	77
3.3.3	算法测试和结果分析	83
3.4	不确定环境下的柔性调度	88
3.4.1	利用 DIGA 求解具有模糊加工时间的 FJSSP	88
3.4.2	利用群体邻域搜索求解模糊柔性作业车间调度	95
3.5	结论	99
第 4 章	机器可用约束调度	101
4.1	引言	101
4.2	具有 PM 的车间调度	102
4.2.1	预防性维修策略	102
4.2.2	具有 PM 活动的流水车间调度	104
4.3	具有 PM 的柔性调度	108
4.4	具有 PM 的模糊调度	115
4.5	具有随机故障的 FSSP	124
4.6	JSSP 与随机故障	127
4.6.1	具有正态分布随机故障的 SJSSP	127
4.6.2	具有指数分布随机故障的 SJSSP	129
4.7	结论与展望	136
第 5 章	批处理机调度和可重入调度	137
5.1	概述	137

5.2	单批处理机调度	138
5.2.1	问题描述	138
5.2.2	基于 SA 的单批处理机调度	138
5.2.3	基于 GA 的单批处理机调度	140
5.2.4	算法测试	143
5.3	并行批处理机调度	146
5.3.1	启发式方法	146
5.3.2	混合遗传启发式 (HGH) 算法	148
5.3.3	算法测试	152
5.4	流水车间批处理机调度	156
5.4.1	基于 SA 的双批处理机流水车间调度	156
5.4.2	基于 VNS 的多批处理机流水车间调度	157
5.4.3	基于 NSA 的多机流水车间批处理机调度	165
5.5	可重入调度	170
5.5.1	多阶段可重入 ICFTSP	170
5.5.2	案例研究	172
5.5.3	多阶段可重入 ICFTSP 求解算法	175
5.5.4	算法测试	177
5.6	结论与展望	179
第 6 章	多目标智能调度	180
6.1	多目标优化基本概念	180
6.2	多目标流水车间调度	181
6.2.1	多目标流水车间调度概述	181
6.2.2	基于进化算法的多目标流水车间调度	182
6.3	多目标作业车间调度	186
6.3.1	多目标作业车间调度综述	186
6.3.2	基于 GA 的多目标作业车间调度	187
6.4	多目标柔性调度	193
6.4.1	调度问题描述	194
6.4.2	混合粒子群方法	195
6.5	多目标模糊调度	198
6.5.1	模糊调度: Sakawa 方法	198
6.5.2	模糊作业车间调度: CMEA 方法	201
6.5.3	模糊调度: 粒子群方法	204
6.6	多目标随机调度	208
6.6.1	具有正态分布随机加工时间的多目标 SJSSP	209
6.6.2	计算结果	211

6.7 多目标批处理机调度	213
6.7.1 多目标禁忌搜索	213
6.7.2 计算实验	216
6.8 结论与展望	218
第7章 智能调度技术在实际制造过程中的应用	220
7.1 在钢铁生产中的应用	220
7.2 在化工生产中的应用	226
7.2.1 基于差分进化的间隙与连续混合生产调度	226
7.2.2 多产品化工间歇调度问题	233
7.3 半导体晶圆生产调度	239
7.3.1 半导体晶圆制造概述	239
7.3.2 基于 GA 的 300mm 晶圆批调度	240
7.3.3 晶圆工厂小批-订单分配问题	246
7.4 结论	252
附录 部分调度问题的测试实例	253
参考文献	260

绪 论

制造系统调度^[1]就是在一定时间内,通过可用共享资源的分配和生产任务的排序,来满足某些指定的性能指标。具体来说,就是针对某项可以分解的工作,在一定约束条件下,合理安排其组成部分所占用的资源、加工时间及先后顺序,以获得产品制造时间或者成本等最优。

生产调度是制造过程的重要环节,通过合理的调度方案,将提高设备利用率,减少能耗和物耗,降低库存和减少成本,从而提高制造系统的操作最优性,为制造企业带来显著的经济效益,提高其市场竞争力。本章主要介绍制造系统调度问题的基本概念、典型调度问题、智能调度方法分类和智能优化算法等。

1.1 制造过程调度问题

1.1.1 调度问题分类

制造过程根据其输出产品的特性,分为连续制造过程、间隙制造过程和离散制造过程。

在连续制造过程中,原料经由不同的专用设备加工转变为产品。每个设备都是在稳定的工作状态下,完成一项规定的生产操作。连续制造过程的输出是连续的产品流。

间隙制造过程又称为批处理过程,是由一个或者多个按一定顺序执行的操作步骤或者操作阶段组成的。这些操作步骤是离散的,而每步中的过程是连续的。间隙制造过程一般包括若干通用设备,多个产品在有限个设备上生产。

在离散制造过程中,产品通常是分批制造的,一定数量原料相同、加工工序也相同的产品作为一个工件组,在各台机器之间传输,而且每个工件都有独立的个性。机械加工是典型的离散过程。

相应地,制造系统调度问题可以分为面向机械加工等离散操作的车间调度问题和面向流程工业生产过程的间隙生产调度等。

另外, Nagar 等^[2]根据以下四个特征对问题进行了分类:

(1) 问题的性质。

问题的性质是指调度问题的加工条件和参数是确定的,还是不确定的。若加工条件事先给定,则为确定性问题;若加工条件的不确定性由随机理论描述,则为随机调度;由模糊理论描述,则为模糊调度,后两者统称为不确定调度。

(2) 车间构造。

根据车间构造将机器环境分为四类：单机、并行机、流水车间和作业车间。在并行机车间，一组只有一道工序的工件能够在任何一台机器上加工；在流水车间，机器被安排在生产线上，所有工件按相同顺序访问所有机器；在作业车间，工件的加工路径各不相同。

(3) 解决方案。

随着调度研究的深入，调度问题的解决方案已非常丰富，主要包括传统规划方法（如分支定界、启发式方法）和智能算法 [如遗传算法 (GA)、禁忌搜索 (TS) 和模拟退火 (SA) 等]。

(4) 性能指标。

性能指标包括单目标和多目标两种，其中单目标以最大完成时间（即 makespan）和拖后目标（如最大拖后时间）等指标中的一个为目标；多目标则同时优化 2 个或 2 个以上的目标。

1.1.2 调度问题特性描述

在调度问题中，通常存在一组工件 (J_1, J_2, \dots, J_n) ，每个工件具有 h_i 道工序，以及一组机器 (M_1, M_2, \dots, M_m) 。一个调度问题常用三元组 $\alpha|\beta|\gamma$ 描述^[3,4]。 α 域描述机器环境； β 域提供加工特征和约束的细节，一个实际问题可能不包含其中任何一项，也可能有多项； γ 域描述性能指标。

1. 机器环境

α 域所描述的机器环境包括：

(1) 单机。单机是所有机器环境中最简单的，是所有其他环境的特例。

(2) 并行机。并行机具有相同的功能，可分为三类：同速机即并行的 m 台机器具有相同的速度；恒速机即并行的 m 台机器速度不同，但每台机器的速度为常数；变速机即机器的速度依赖于加工的工件。

(3) 流水车间。流水车间有串行的 m 台机器，每个工件必须以相同的加工路径访问所有机器。在一台机器上加工完毕后，工件进入第二台机器的缓冲区，等待加工，依次访问，直到所有工序加工完毕。如果工件的体积很小（如集成电路），机器间可以大量存放，可认为缓冲区无穷大；当工件的体积较大（如电视机），则认为机器间缓冲区有限。

(4) 柔性流水车间。柔性流水车间是流水车间和并行机的综合。在柔性流水车间中，工件的加工要经过 m 个阶段，每个阶段存在多台功能相同的并行机，工件在某个阶段加工时，需从该阶段存在的多台机器中，选择一台进行加工。

(5) 作业车间。作业车间的每个工件都要访问所有机器，但每个工件都有自己的机器访问顺序。

(6) 开放车间。开放车间的每个工件可以在每台机器上进行多次加工，有些加工时间可以为零，对工件的加工路径没有任何限制。

2. 加工约束

β 域所描述的加工约束可能包括：

(1) 提交时间。提交时间是指工件到达系统的时间，也就是工件可以开始加工的最早时间。

(2) 与加工顺序相关的调整时间。它也称分离调整时间即不能包含在加工时间内的调整时间。

(3) 中断。中断意味着不必将一个工件在其加工完成之前一直保留在机器上，它允许调度人员在任何时间中断正在加工工件的加工，而安排机器做另外的工作（如加工其他工件或者维修等）。通常假设不允许中断，若允许中断，则该条件将出现在 β 域中。

(4) 故障。机器故障意味着机器不可用。

(5) 优先约束。优先约束是指某道工序开始之前，其他一道或多道工序必须完成。

(6) 阻塞。如果一个流水车间在两台相邻的机器之间只有有限的缓冲区，当缓冲区变满后，上游的机器无法释放已加工完毕的工件，加工完的工件只能停留在该机器上，从而阻止了其他工件在该机器上加工。

(7) 零等待。零等待是指不允许工件在两台机器间等待，工件的加工一旦开始，就必须无等待地访问所有机器。例如，在轧钢厂，钢板的生产就不允许等待，因为在等待过程中，钢板会变冷。关于阻塞和零等待，不一定只出现在流水车间，作业车间中也可以出现^[5,6]。

(8) 再循环。同一工件可能重复访问同一机器多次。

3. 调度问题的性能指标

γ 域描述中性能指标有以下几类：

(1) 基于加工完成时间的指标。

1) 最大完成时间

$$C_{\max} = \max\{C_i\}$$

这是调度研究中最常见的指标。

2) 平均完成时间

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$$

3) 最大流经时间

$$F_{\max} = \max_{1 \leq i \leq n} F_i = \max_{1 \leq i \leq n} \{C_i - r_i\}$$

式中： C_i 为工件 J_i 的加工完成时间； r_i 为提交时间； F_i 为工件 J_i 从进入制造系统到加工完毕离开系统所经历的时间，为流经时间。

4) 总流经时间 $\sum_{i=1}^n F_i$ 。

5) 加权流经时间 $\sum_{i=1}^n w_i F_i$ 。

6) 平均流经时间 $\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i$ 。

(2) 基于交货期的性能指标。

1) 总拖后时间

$$\sum_{i=1}^n T_i$$

2) 最大拖后时间

$$T_{\max} = \max_{1 \leq i \leq n} \{T_i\}$$

3) 平均拖后时间

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$$

$$T_i = \max\{C_i - d_i, 0\}$$

式中： T_i 为工件 J_i 的拖后时间； d_i 为 J_i 的交货期，如果工件的完成时间大于其交货期，则工件交货拖后，其延迟时间 $L_i = C_i - d_i$ 。

4) 平均延迟时间 \bar{L} 和最大延迟时间 L_{\max} 。

5) 拖后工件个数 n_T 即完成时间大于交货期的工件数。

拖后目标与顾客满意度有关，也是调度问题的一类重要目标。

(3) 基于库存的性能指标。

1) 平均已完成工件数 \bar{N}_c 。

2) 平均未完成工件数 \bar{N}_u 。

3) 平均机器空闲时间 \bar{I} 。

4) 最大机器空闲时间 I_{\max} 。

这类指标在调度研究中很少涉及。

(4) 基于机器负荷的性能指标。

1) 最大机器负荷 WL_{\max} ，即具有最大加工时间和的机器的负荷。

2) 总机器负荷 WL_{tot} ，即所有机器所有加工时间之和。

3) 机器负荷间的平衡，即所有机器负荷之间的方差或标准差。

以上性能指标，按正规性，可分为正规性能指标和非正规性能指标。

定义 1.1 对于一个调度问题，性能指标 R 是正规的，若对于满足不等式关系 $C_1 \leq C'_1$ 和 $C_2 \leq C'_2, \dots, C_n \leq C'_n$ 的任意两组加工完成时间 $\{C_i\}$ 和 $\{C'_i\}$ ，也满足以下关系

$$R(C_1, C_2, \dots, C_n) \leq R(C'_1, C'_2, \dots, C'_n) \quad (1-1)$$

可以验证， \bar{C} 、 C_{\max} 、 \bar{F} 、 F_{\max} 、 \bar{L} 、 L_{\max} 、 \bar{T} 、 T_{\max} 和 n_T 都是正规指标。

除了以上单一指标外，还存在两类指标：

(1) 综合性指标，如平均流经时间和总拖后时间的综合，即 $\bar{F} + w \sum_{i=1}^n T_i$ ，其中， w 为权值。

(2) 多指标。这些指标之间往往存在冲突，需要同时优化，如同时最小化 makespan 和最大拖后时间 T_{\max} 。

4. 调度类型

通常情况下，存在三种调度类型，即非延迟调度、活动调度和半活动调度。

定义 1.2 称一个调度为非延迟调度，如果至少存在一个工件等待加工时，不存在相应处于空闲的该工件的加工机器。

一个调度是非延迟的等价于禁止非强迫的空闲。

定义 1.3 称一个调度为活动调度，如果在推迟其他工序或破坏优先约束条件下，没有一道工序的加工可以提前。

换句话说，如果没有工序可以插入到前面的空闲时间段内并保持可行性，则调度是活动

的，无中断、非延迟的调度必然是活动的，反之则不然。

定义 1.4 称一个调度为半活动调度，如果在不改变机器上的加工顺序的条件下，没有一道工序的加工能提前。

一个活动调度一定是半活动的；反之则不一定。

图 1-1 描述了三类调度的韦恩图。

对于正规性能指标，已经证明，最优调度必在活动调度集中，这样在设计优化算法时，将搜索空间限于活动调度集，不仅能保证最优调度的存在，还能提高优化效率；但对于非正规性能指标，如准时制（just-in-time, JIT）调度的目标函数，其最优调度可能为半活动调度。

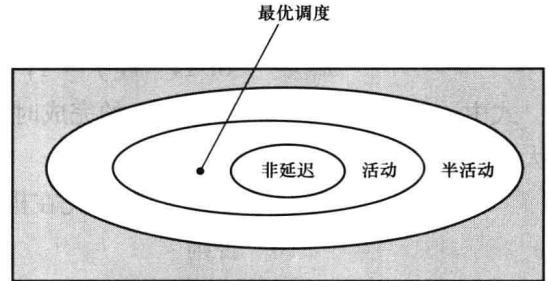


图 1-1 加工车间调度种类的韦恩图

1.1.3 典型调度问题描述^[7~10]

1. 车间调度问题

车间调度问题研究 n 个工件在 m 台机器上加工，每个工件具有一定数量的工序，每道工序可以在若干台机器上加工。在车间调度问题中，通常有很多假设：如每一台机器在每个时刻只能加工一个工件的一道工序；每道工序也只能被一台机器加工；各工件按给定的工艺路线以指定的次序在机器上加工，只能在上一道工序加工完成后才能开始下一道工序的加工等。

经典车间调度问题分为置换流水车间调度、流水车间调度和作业车间调度三种形式，它们都研究 n 个工件在 m 台机器上的加工过程，但区别在于，作业车间调度中，各工件访问所有机器的顺序不会完全一样，而流水车间调度中，各工件以相同的顺序访问所有机器，但各机器上工件的加工次序会不一样；如果各工件的机器访问顺序完全一样，各机器上工件的加工次序也一样，则为置换流水车间调度。因此，置换流水车间调度和流水车间调度为作业车间调度的特例。随着加工约束的放松，如允许同一工件访问同一机器多次或者进一步放宽加工路径约束，则出现了新的车间调度形式。

(1) 作业车间调度问题 (JSSP)。

JSSP 由 n 个工件和 m 台机器组成。每个工件具有一定数量的工序，其加工路径事先给定。每道工序的加工机器和加工时间事先给定，除此之外，还有一些机器和工件约束，具体内容如下所述。

- 1) 一个工件不能访问同一机器两次。
- 2) 不同工件的工序之间没有优先约束。
- 3) 工序加工不能被中断。
- 4) 一台机器不能同时加工多个工件。
- 5) 开工时间和交货期均未指定。
- 6) 不考虑工件加工的优先权。
- 7) 工序加工容许等待，即前一道工序未完成，则后续的工序要等待。

JSSP 的数学描述如下：

$$\min \max_{1 \leq k \leq m} \{ \max_{1 \leq i \leq n} \{ c_{ik} \} \} \quad (1-2)$$

s. t.

$$c_{ik} - p_{ik} + M(1 - a_{ihk}) \geq c_{ih}, \quad i = 1, 2, \dots, n; h, k = 1, 2, \dots, m \quad (1-3)$$

$$c_{jk} - c_{ik} + M(1 - x_{ijk}) \geq p_{ik}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (1-4)$$

$$c_{ik} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (1-5)$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ or } 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (1-6)$$

式中： c_{jk} 为工件 J_j 在机器 M_k 上的完成时间； p_{jk} 为工件 J_j 在机器 M_k 上的加工时间； M 为大正数。

$$a_{ihk} = \begin{cases} 1 & \text{如果工件 } J_i \text{ 先在机器 } M_h \text{ 上加工, 后在 } M_k \text{ 上加工} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (1-7)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{如果在机器 } M_k \text{ 上, 工件 } J_i \text{ 先于 } J_j \text{ 加工} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (1-8)$$

以上模型中，目标函数为 makespan，式（1-3）表明每个工件的工序加工顺序按事先规定的路径进行，式（1-4）表明每台机器同一时刻只能加工一个工件。

（2）流水车间调度问题（FSSP）。

FSSP 一般可以描述为： n 个工件由 m 台机器加工，每个工件具有一定数量的工序，每个工件以相同的顺序访问所有机器，工件在机器上的加工时间固定，问题的目标是求所有工件的最优加工顺序，使最大完成时间最小。

对 FSSP 常做以下假设：

- 1) 每个工件在机器上的加工顺序相同。
- 2) 每台机器在同一时刻只能加工一个工件的某道工序。
- 3) 一个工件不能同时在两台以上的机器加工。
- 4) 工序的调整时间与顺序无关，且包含在加工时间中。
- 5) 缓冲区容量无穷大。

FSSP 是一种重要的制造系统调度问题，实际制造过程中的许多调度问题都可以简化为 FSSP，其中置换流水车间调度问题（PFSSP）就是 FSSP 的一种特例，该问题不仅工件的加工路径一样，而且每台机器上工件的加工顺序也完全一样。不过，就智能优化来说，这两个问题的解决方法相似，甚至可以用相同的方法求解，以遗传调度来说，通常都采用工件排列对这两个问题的解进行编码。

（3）开放车间调度问题（OSSP）。

OSSP 具有如下特点：各工件的工序事先给定，但无加工路径约束，每道工序只能由一台机器加工，工件不重入。具体描述如下： n 个工件（ J_1, J_2, \dots, J_n ）和 m 台机器（ M_1, M_2, \dots, M_m ），工件 J_i 的释放时间和交货期为 r_i 和 d_i ，一共有 h_i 道工序，每道工序的加工机器只有一台，加工过程不允许中断，一台机器同一时刻只能加工一个工件，同一工件同一时刻只能由同一台机器加工。

（4）一般作业车间调度问题^[11]（GJSSP）。

GJSSP 是更一般的 JSSP。具体描述如下： n 个工件（ J_1, J_2, \dots, J_n ）和 m 台机器

(M_1, M_2, \dots, M_m), 工件 J_i 的释放时间和交货期分别为 r_i 和 d_i , 一共有 h_i 道工序, 但工件的加工路径不一定线性, 即在加工路径中, 某道工序可能只有当每道工序加工完毕后, 才能加工该工序, 如图 1-2 所示。不过, 工件的最后一道工序唯一, 每道工序可以由多台机器加工, 调整时间依赖于加工顺序, 加工过程不允许中断, 一台机器同一时刻只能加工一个工件, 同一工件同一时刻只能由同一台机器加工。

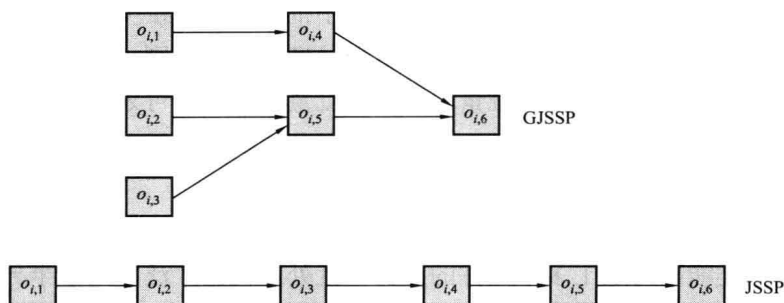


图 1-2 GJSSP 与 JSSP 加工路径对比

(5) 可重入车间调度问题 (Re-entrant Shop Scheduling Problem)。

可重入车间调度的典型特征是: 一个工件可以多次访问同一机器。可重入车间广泛存在于高新技术企业, 如半导体制造企业和印制电路板企业。可重入车间调度包括可重入作业车间调度和可重入流水车间调度, 它们一般与 JSSP 和 FSSP 基本约束相同, 除了以下条件即每个工件可以访问同一机器多次, 但一个工件前后相邻的两道工序必须在不同机器上加工, 加工时间与加工顺序无关。

(6) 柔性车间调度问题。

生产的柔性包括设备使用柔性和设备安排柔性, 其中前者指设备可用于多个工件的多道工序的加工; 而后者是指工件的设备加工路径不是固定和预先确定的, 具有可选的路径。

这类问题包括柔性流水车间调度和柔性作业车间调度两种。在 FSSP 和 JSSP 中, 每道工序只能由一台机器加工, 而在柔性车间调度中, 具有设备安排柔性, 至少一道工序存在多台加工机器, 或者至少一个工件存在多种可能的加工路径。

2. 批量调度

批量调度存在两种不同类型的问题。一类问题为工件类型调度 (family scheduling); 另一类问题为批处理机调度。20 多年以来, 批量调度引起了人们广泛的研究兴趣, 两种类型的批量调度^[12]得到了一定程度的研究, 取得了一些有价值的研究成果, 其研究随着半导体和钢铁等工业的发展, 受到学术界和工程界越来越多的关注。

(1) 工件类型调度。

利用相似性将工件划分为几种不同类型以节省准备时间, 同一类型内先后加工的两个工件之间无需准备时间, 同一类型工件组批, 批加工时间为批内所有工件加工时间之和。

一个典型工件类型调度问题描述^[13]如下:

n 种工件 (J_1, J_2, \dots, J_n) 和 m 台机器 (M_1, M_2, \dots, M_m), 至少一种工件的数量大于 1, 工序加工时间固定, 工件的装卸时间包含在加工时间内, 每台机器同一时刻只能加

工一个工件，批量准备时间也是确定的。批量准备时间是指调整工具和更换夹具等所需的时间，这些时间与工件类型有关，批量准备时间可以和加工时间分开考虑。在批量生产中，如果等一批工件全部完工后再转移到后续机器，将导致机器等待时间过长、利用率过低；如果加工完部分工件后，再转移，可以使后续工序提前开工，这样同一批工件要经过多次运输才能到达加工下一道工序的机器。

关于批量大小，大批量可以提供机器利用率，小批量可以提供生产效率，但会导致管理更加复杂，为了兼顾生产效率和车间管理，批量划分遵循 3 个原则，即最小批量原则、等量分配原则和直接批量划分原则。最小批量原则就是批量大小等于可划分的最小批量大小；等量分配原则将工件划分为同样大小的批；直接批量划分原则把工件分成几个批，使各个批的大小与客户需要一致。

(2) 批处理机调度。

批处理机是一类能同时加工多个工件的机器，批处理机已广泛应用于半导体制造的扩散和氧化操作、半导体测试的老化操作、金属加热的热处理、印制电路板封装以及食品、化工和制药工业等。批处理机调度突破了传统调度问题中一台机器上任何时刻只能加工一个工件的假设，具有以下特点：

1) 对工件的加工以批为单位进行，设批处理的批容量为 C ，则在加工时，要把工件分成若干批，每批工件大小之和不能超过 C 。

2) 批加工时间或者由批内工件的最大加工时间决定，或者为常数。

3) 同一批内的工件具有相同的加工开始时间和完成时间，一批工件的加工一旦开始，就不能中断。

整个调度问题可以分解为工件分批和批调度两个子问题。

常见的批处理机调度形式有：

1) 在需要加工的所有工件中，每个工件都可以和其他任何工件组成一批进行加工，批加工时间固定，且与工件类型无关。

2) 只有一种类型工件，每个工件可以有不同的加工时间，而批加工时间等于批中工件的最大加工时间。半导体制造中的老化操作调度就是这类问题。

3) 存在多种类型的工件，只有属于同一类型的工件才能安排在同一批中进行加工，批加工时间也由批内工件的最大加工时间决定。

根据车间构造，可分为单批处理机调度、并行批处理机调度和流水车间批处理机调度等。其中，单批处理机调度指对工件进行组批，然后由一台批处理机按一定次序进行加工；并行批处理机指功能类似的多台机器聚集在一起，共同完成相似的加工任务，如半导体制造生产线的氧化炉管，并行批处理机调度包括工件组批、加工机器分配和批调度三个子问题；流水车间批处理机调度指工件分批所得的批以相同的顺序依次访问所有批处理机。

3. E/T 调度

E/T 调度是一类以 E/T 指标为目标函数的调度问题。E/T 调度的提出是为了适应 JIT 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采用，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，而 E/T 指标就反映了这方面