

中国科学院科学出版基金资助出版

# 生产调度智能算法及其应用

王万良 吴启迪 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

生产调度是实施 CIMS 的关键环节之一,因此,生产调度理论的研究和应用系统的开发都受到学术界和企业界的关注,但生产调度问题通常是多约束、多目标、随机不确定优化问题,已被证明是属于 NP 问题,因此,一直是学术界的研究热点。

本书的主要内容来源于作者多年研究的积累,也包括了一些前人研究的成果,使读者比较全面地了解生产调度方法的全貌。本书最显著的特点是理论与工程实际相结合。在理论上,系统地研究了车间生产调度问题和流程工业生产调度问题的遗传算法、神经网络、模糊理论、粒子群算法等智能调度算法,纠正了一些已有方法中存在的错误,提出或改进了一些调度方法。在工程应用上,介绍了炼油、电声、水电站等企业的生产调度系统。

本书可供计算机、自动化、机械、化工、管理、应用数学及与之相关的工程应用领域的教学与科研人员阅读,也可作为相关专业的研究生教材或教学参考书,特别是可供企业生产管理人员阅读与参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

生产调度智能算法及其应用/王万良,吴启迪著.—北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-019377-3

I. 生… II. ①王… ②吴… III. 企业-生产调度-人工智能-算法理论 IV. F273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 105207 号

责任编辑:王志欣 张海娜/责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平/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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007 年 7 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007 年 7 月第一次印刷 印张: 21 1/2

印数: 1—3 000 字数: 417 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

# 前 言

随着科学技术的发展，现代生产规模越来越大，复杂性越来越高，市场竞争也越来越激烈，因此对企业的管理提出了更高的要求。在激烈的市场竞争中，企业管理者必须进行科学的管理，使企业产生最大的综合经济效益。

生产调度是管理出效益的重要方面，特别是随着计算机集成制造系统的发展，生产调度成为实施 CIMS 的关键环节之一。因此，生产调度理论的研究和应用系统的开发都受到学术界和企业界的关注。但生产调度问题通常是多约束、多目标、随机不确定优化问题，已被证明是属于 NP 问题。因此，虽然对生产调度问题的研究已经有几十年的历史，提出了许多调度方法，但至今尚未形成一套系统的理论与方法，特别是难以解决实际生产管理中的大规模优化问题。

本书的主要内容来源于作者及其研究生们多年研究的积累，最显著的特点是理论与工程实际相结合。在理论上，本书系统地研究了确定性和不确定性生产调度问题，流水车间、作业车间和流程工业生产调度问题，求解生产调度问题的遗传算法、神经网络、模糊理论等智能算法，并用 VC++ 程序设计语言开发了生产调度智能算法软件包。在用遗传算法求解车间生产调度和流程生产调度问题中，提出了新的编码方法，改进了遗传操作算法，很好地处理了工序之间的约束关系，保证了遗传操作时个体的合法性。在用神经网络方法的研究中，纠正了国际上 Foo 和 Takefuji 提出的很有影响的基于 Hopfield 神经网络的作业车间调度方法中存在的错误，全面考虑了作业车间调度问题的约束条件，给出了新的计算能量函数表达式；提出了新的基于 Hopfield、随机、混沌等神经网络的作业车间调度方法，保证了调度解的合法性，提高了寻优速度；研究了流程工业生产调度问题建模及其基于遗传算法的调度方法，给出了具有离散变量和连续变量的流程工业生产调度问题的遗传编码方法；提出了具有模糊交货期的连续生产过程动态调度方法。在工程应用上，系统介绍了电声企业、炼油企业和水电生产调度系统的设计与实现方法。

本书得到中国科学院科学出版基金和浙江工业大学专著与研究生教材出版基金资助。本书涉及作者的科研成果是在国家自然科学基金“（60374056）基于自治与协作机制的不确定生产过程动态调度方法及其应用”、“（60374005）复杂生产制造过程的分布式协同智能调度方法研究”、“（70271035）基于群体智能优化理论的企业资源计划问题研究”、“（70531020）组件化可重构多重入复杂制造系统生产计划与调度体系结构及其关键问题研究”、“（60573123）网络控制系统智

能调度与控制协同方法及其仿真平台研究”，国家 863 计划 “（863-511-945-002）面向流程工业生产调度与过程控制的集成建模技术”、“（2002AA412610）流程工业企业生产计划与实时调度技术及软件”，浙江省科技计划 “（012047）生产计划与调度的智能算法软件包研制”、“（2003C21005）小水电站远动监控系统与优化运行软件开发”、“（2004C11011）快速响应客户需求的创新设计平台和企业应用集成系统研究及其在电声零件行业中的应用”等项目资助下取得的。本书的部分成果获得中国机械工业科学技术奖、浙江省政府科研成果奖、上海市研究生优秀学位论文等奖励，鼓励了作者的研究。值此表示衷心的感谢！

本书可供计算机、控制、机电、管理、应用数学等领域的教学、科研与生产管理人员阅读，也可作为相关专业研究生的教材或教学参考书。

王万良 吴启迪

2007年3月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 生产调度系统的功能与特点 .....	3
1.2.1 生产计划/调度的任务 .....	3
1.2.2 生产调度系统的功能分析 .....	5
1.2.3 生产调度系统的特点 .....	6
1.3 生产调度问题的描述 .....	8
1.3.1 生产调度问题 .....	8
1.3.2 车间调度问题 .....	9
1.3.3 流水车间调度问题 .....	10
1.3.4 作业车间调度问题 .....	12
1.3.5 间隙生产调度问题 .....	14
1.3.6 动态调度问题 .....	16
1.4 生产调度方法 .....	18
1.4.1 优化方法与启发式方法 .....	18
1.4.2 数学规划方法 .....	19
1.4.3 规则调度方法 .....	19
1.4.4 基于人工智能的方法 .....	20
1.4.5 基于仿真的方法 .....	23
1.4.6 控制理论方法 .....	24
1.5 本书的主要内容 .....	26
参考文献 .....	28
<b>第 2 章 生产调度的启发式算法</b> .....	34
2.1 引言 .....	34
2.2 流水车间调度的启发式算法 .....	34
2.2.1 引言 .....	34
2.2.2 Johnson 启发式算法 .....	35
2.2.3 CDS 启发式算法 .....	36
2.2.4 Palmer 启发式算法 .....	37
2.2.5 RA 启发式算法 .....	37
2.2.6 NEH 启发式算法 .....	37

2.2.7	Gupta 启发式算法 .....	38
2.2.8	BG 启发式算法 .....	38
2.3	作业车间调度的启发式算法 .....	38
2.3.1	引言 .....	38
2.3.2	优先分配启发式算法 .....	39
2.3.3	随机分配启发式算法 .....	41
2.3.4	瓶颈移动启发式算法 .....	41
	参考文献 .....	42
<b>第 3 章</b>	<b>基于遗传算法的流水车间调度方法 .....</b>	<b>43</b>
3.1	引言 .....	43
3.2	遗传算法 .....	44
3.2.1	遗传算法的产生与发展 .....	44
3.2.2	遗传算法的基本算法 .....	45
3.2.3	双倍体遗传算法 .....	58
3.2.4	双种群遗传算法 .....	60
3.2.5	自适应遗传算法 .....	61
3.3	基于遗传算法的流水车间生产调度方法 .....	64
3.3.1	流水车间调度问题的编码方法 .....	65
3.3.2	适应度函数 .....	65
3.3.3	流水车间调度的 Reeves 方法及其仿真 .....	65
3.4	基于遗传算法的模糊流水车间调度方法 .....	68
3.4.1	引言 .....	68
3.4.2	模糊流水车间调度问题 .....	69
3.4.3	模糊交货期的 FSP 遗传算法求解方法 .....	72
3.5	遗传算法求解 FSP 实例 .....	74
3.5.1	算例 .....	74
3.5.2	汽车发动机厂金工车间调度 .....	76
3.6	基于遗传算法的混合流水车间调度方法 .....	77
3.6.1	混合流水车间调度问题 .....	77
3.6.2	混合 Flow-shop 调度问题的遗传算法编码方法 .....	78
3.6.3	基于遗传算法的求解方法 .....	79
3.6.4	混合流水车间调度实例 .....	80
3.7	讨论 .....	83
	参考文献 .....	83
<b>第 4 章</b>	<b>基于遗传算法的作业车间调度方法 .....</b>	<b>85</b>
4.1	引言 .....	85
4.2	作业车间调度遗传算法的基本设计方法 .....	86

4.2.1 适应度函数设计 .....	86
4.2.2 编码方法 .....	87
4.3 基于工序编码的作业车间调度遗传算法 .....	87
4.3.1 基于工序的编码方法 .....	87
4.3.2 遗传操作 .....	89
4.3.3 Cheng-Gen-Tsujimura 改进方法 .....	91
4.4 基于优先列表编码的作业车间调度遗传算法 .....	92
4.5 基于优先规则编码的作业车间调度遗传算法 .....	93
4.6 基于完成时间表达法的作业车间调度遗传算法 .....	94
4.7 基于工件的表达法的作业车间调度遗传算法 .....	95
4.8 基于工件对关系的作业车间调度遗传算法 .....	96
4.9 基于非连接图表达法的作业车间调度遗传算法 .....	97
4.10 基于机器表达法的作业车间调度遗传算法 .....	98
4.11 基于随机键表达法的作业车间调度遗传算法 .....	98
4.12 基于换位矩阵表示的作业车间调度遗传算法 .....	99
4.13 作业车间调度遗传算法的仿真 .....	100
4.14 基于遗传算法的柔性作业车间调度方法 .....	104
4.15 讨论 .....	108
参考文献 .....	110
<b>第 5 章 基于神经网络的生产调度方法 .....</b>	<b>112</b>
5.1 引言 .....	112
5.2 Hopfield 神经网络优化方法 .....	113
5.2.1 离散型 Hopfield 神经网络 .....	113
5.2.2 连续型 Hopfield 神经网络 .....	115
5.2.3 Hopfield 神经网络优化计算方法 .....	118
5.3 JSP 的 Hopfield 神经网络求解方法 .....	119
5.3.1 JSP 的换位矩阵 .....	119
5.3.2 JSP 的 Hopfield 神经网络表示 .....	121
5.3.3 由换位矩阵构造成本树的方法 .....	123
5.3.4 由成本树构造甘特图的方法 .....	126
5.3.5 基于 Hopfield 神经网络的生产调度方法仿真 .....	128
5.4 基于随机神经网络的生产调度方法 .....	132
5.4.1 引言 .....	132
5.4.2 基于模拟退火算法的生产调度方法 .....	133
5.4.3 随机神经网络 .....	137
5.4.4 基于玻尔兹曼机的作业调度方法 .....	138

---

5.4.5	基于玻尔兹曼机的作业调度方法仿真	139
5.5	基于混沌神经网络的生产调度方法	144
5.5.1	引言	144
5.5.2	混沌神经网络	144
5.5.3	基于混沌神经网络的优化方法	147
5.5.4	JSP 的 TDNN 方法	148
5.5.5	示例仿真	150
5.6	讨论	152
	参考文献	153
<b>第 6 章</b>	<b>确定性流程工业生产调度方法</b>	<b>157</b>
6.1	引言	157
6.2	基于统一时间离散化表示的生产调度模型	158
6.2.1	统一时间离散化表示的时间划分	158
6.2.2	生产调度问题的变量	158
6.2.3	生产调度问题的约束条件	159
6.2.4	生产调度问题的目标函数	160
6.3	基于统一事件点的连续时间表示的调度模型	161
6.3.1	引言	161
6.3.2	生产调度问题的变量	162
6.3.3	调度问题非统一时间离散化表示	162
6.3.4	生产调度的约束条件	163
6.3.5	生产调度问题的目标函数	165
6.4	基于分离事件点的连续时间表示的调度模型	165
6.4.1	引言	165
6.4.2	生产调度问题的参数与变量	166
6.4.3	生产调度问题的约束条件与目标函数	166
6.4.4	生产调度模型的扩展	168
6.5	NUDM 与 UDM 两种模型的关系	169
6.5.1	NUDM 模型还原为 UDM 模型	169
6.5.2	两种模型的仿真与比较	170
6.6	并行连续生产线多产品循环调度模型	174
6.6.1	引言	174
6.6.2	问题的描述	174
6.6.3	数学模型的建立	176
6.6.4	模型的线性化	181
6.7	对硝基苯甲酸乙酯车间生产调度问题的建模	183
6.7.1	问题描述	183

---

6.7.2	数学模型	184
6.7.3	最优调度	186
6.8	讨论	186
	参考文献	186
<b>第7章</b>	<b>不确定性流程工业生产调度方法</b>	<b>189</b>
7.1	不确定性生产调度问题	189
7.1.1	生产系统的不确定性	189
7.1.2	不确定因素的处理方法	190
7.1.3	考虑不确定性的模糊调度	190
7.1.4	化工批处理过程的不确定性短期调度	191
7.2	模糊操作时间下的多产品批处理过程生产调度	192
7.2.1	引言	192
7.2.2	中间存储策略对多产品批处理过程调度的影响	193
7.2.3	模糊操作时间下的多产品批处理过程调度模型	197
7.2.4	基于遗传算法的调度方法	207
7.2.5	基于粒子群算法的调度方法	212
7.3	带有模糊交货期的多产品批处理过程生产调度	216
7.3.1	引言	216
7.3.2	交货期满意度的描述	217
7.3.3	模糊交货期下的多产品批处理过程调度模型	219
7.3.4	基于遗传算法的调度方法	221
7.3.5	基于粒子群算法的调度方法	222
7.3.6	仿真计算与分析	222
7.4	模糊操作时间和模糊交货期下的多产品批处理过程生产调度	225
7.4.1	引言	225
7.4.2	模糊操作时间和模糊交货期下多产品批处理过程生产调度的特点	226
7.4.3	模糊操作时间和模糊交货期下的多产品批处理过程生产调度模型	226
7.4.4	仿真计算与分析	230
7.5	讨论	234
	参考文献	235
<b>第8章</b>	<b>炼油企业生产计划与调度系统</b>	<b>237</b>
8.1	引言	237
8.2	炼油生产过程	238
8.2.1	炼油厂生产的一次加工装置	238
8.2.2	炼油厂生产的二次加工装置	240
8.2.3	炼油厂生产的三次加工装置	242
8.2.4	油品调和	243

8.3	炼油厂生产计划与调度数学模型 .....	244
8.3.1	引言 .....	244
8.3.2	炼油生产调度决策量选择 .....	244
8.3.3	原油混炼调度数学规划模型 .....	247
8.3.4	生产装置调度模型 .....	249
8.3.5	成品油调和调度模型 .....	252
8.3.6	炼油生产调度问题求解方法 .....	254
8.4	炼油生产计划与调度软件工程实现 .....	254
8.4.1	炼油生产计划与调度系统总体结构 .....	254
8.4.2	数据管理子系统 .....	255
8.4.3	算法子系统 .....	256
8.4.4	软件主要功能 .....	257
8.5	炼油生产计划与调度实例 .....	259
8.6	讨论 .....	263
	参考文献 .....	264
<b>第 9 章</b>	<b>电声企业生产计划与调度系统 .....</b>	<b>266</b>
9.1	引言 .....	266
9.2	系统逻辑模型和结构 .....	267
9.3	生产计划系统 .....	269
9.3.1	多 Agent 交互模型 .....	269
9.3.2	合同网协商改进模型 .....	271
9.3.3	生产计划预调度模型 .....	272
9.4	生产调度系统 .....	273
9.4.1	生产调度系统结构 .....	273
9.4.2	车间作业调度模型 .....	273
9.4.3	车间作业调度策略 .....	280
9.4.4	车间调度基础信息 .....	282
9.5	生产计划与调度系统的工程实现 .....	283
9.5.1	系统的主界面 .....	283
9.5.2	计划管理 Agent 子系统 .....	283
9.5.3	资源 Agent 子系统 .....	284
9.5.4	车间调度子系统 .....	285
	参考文献 .....	286
<b>第 10 章</b>	<b>水电站优化调度系统 .....</b>	<b>287</b>
10.1	引言 .....	287
10.2	水电站优化调度研究进展 .....	287
10.2.1	水电站优化调度问题 .....	287

---

10.2.2	水电站优化调度方法 .....	288
10.2.3	水电站优化调度决策支持系统 .....	293
10.3	基于遗传算法的小型水电站优化调度方法 .....	293
10.3.1	小型水电站单库优化调度问题的数学模型 .....	293
10.3.2	小型水电站单库优化调度问题遗传算法的设计 .....	295
10.3.3	小水电站优化调度仿真 .....	297
10.4	基于遗传算法的小水电群优化调度方法 .....	301
10.4.1	小水电群及其优化调度问题 .....	301
10.4.2	小水电群优化调度数学模型及其求解 .....	302
10.5	水电站厂内经济运行调度 .....	303
10.5.1	引言 .....	303
10.5.2	水电站定点负荷的机组组合与机组负荷分配 .....	304
10.5.3	日负荷任务的机组开/停计划与负荷分配 .....	307
10.6	水电站优化调度决策支持系统 .....	314
10.6.1	系统总体结构 .....	314
10.6.2	计划与调度 .....	316
10.6.3	日(多日)调度决策 .....	318
10.6.4	短期优化调度决策 .....	322
10.6.5	优化调度绩效分析 .....	322
10.7	总结与展望 .....	328
	参考文献 .....	329

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

随着科学技术的发展，生产规模越来越大，复杂性越来越高，市场竞争也越来越激烈，因此对企业的管理和对生产过程的监控都提出了更高的要求。几十年来，各类生产过程都已经发生了显著的变化，其主要特征是生产规模的大型化和生成过程的连续化。在激烈的市场竞争中，为了保证生产的高效稳定运行，以获得最大的经济效益，原来简单的、局部的、常规的控制和仅凭经验的管理已经不能满足现代生产的要求了，企业管理者和控制工程师们面临的问题是：如何根据市场上原料供应和产品需求的变化进行经营决策和组织生产；如何在生产计划改变的情况下对生产过程进行控制，以便最大限度地发挥生产的柔性；如何在生产工艺不作大的改变的前提下进行管理、决策，使企业产生最大的综合经济效益。为了解决上述问题，1973 年美国约瑟夫·哈林顿（Joseph Harrington）博士首次提出计算机集成制造（computer integrated manufacturing, CIM）的概念。

由于 20 世纪 70 年代美国的产业政策中，过分地夸大了第三产业的作用，而将制造业特别是传统产业贬低为“夕阳工业”，这导致美国制造业优势的急剧衰落，特别是在 80 年代初开始的石油危机中暴露无遗。此时，美国才开始重视并决心利用其信息技术的优势。美国及其他各国纷纷制定并执行发展计划。因此，在 80 年代中期基于 CIM 理念的系统 CIMS 才开始得到重视，进行大规模实施。

CIMS 是一种基于 CIM 哲理构成的计算机化、信息化、智能化、集成优化的制造系统。它的内涵是借助计算机，将企业中各种与制造有关的技术系统集成起来，进而提高企业适应市场竞争的能力。关于 CIMS 的基本概念，随着生产实际需要的变化及研究问题的角度的不同，有不同的定义。根据 Guy Doumeingts 和 David Chen 的观点，有两种参考定义。

狭义上讲，CIMS 定义为应用计算机及网络技术实现生产过程各个环节的集成化的系统。这仅仅是基于纯技术的定义，没有考虑经济的、社会的和人的行为因素的影响。广义上讲，CIMS 是一种在某种环境下为提高企业总体效益的全局性的哲理和方法，这种理念要求以集成方式组织企业的全部活动，从设计、制造到销售和售后服务各阶段要尽可能利用各种方法和技术工具（计算机和自动化技术），以及及时地提高生产率、降低成本、按期交货、提高质量，确保生产系统全

局和局部的柔性等。后者说明经济的、社会的和人的行为因素与技术有着同样的重要性。

我国自 1986 年成立 863/CIMS 主题, 提出 CIMS 计划, 经过十几年来对 CIM 哲理的具体实践, 根据中国国情, 赋予 CIM/CIMS 新的概念: CIM 是一种组织、管理与运行企业生产的理念, 它借助计算机硬件及软件, 综合运用现代管理技术、制造技术、信息技术、自动化技术、系统工程技术将企业生产全过程中的有关人、技术、经营管理三要素及其信息流、物流和价值流有机集成并优化, 以达到产品上市快、质量高、能耗低、服务好、环境清洁的目标, 进而提高企业的柔性、健壮性、敏捷性, 使企业赢得市场竞争。

CIM 的首次提出是针对机械制造等离散制造业, 并获得巨大成功。随着 CIM 哲理的不断拓宽, 人们认识到 CIM 哲理和有关技术不仅适用于离散制造业, 而且也适用于流程制造业。CIM 中的 Manufacturing 一词本身就代表广义的加工、制造, 也包括连续或半连续生产的流程工业。1986 年, 欧共体把 CIMS 概念拓宽到流程工业, 即在连续型生产过程中实施 CIMS 计划, 称为流程工业 CIMS, 也称为 CIPS (computer integrated processing systems)。它是借助于计算机 (软、硬件), 综合运用先进的管理技术、信息技术、自动化技术, 与流程工业的生产和设备特点相结合, 通过计算机网络和数据库, 实现企业生产环节的集成, 人、技术、经营管理三要素的统一管理和集成, 物流和信息流有机的集成并优化运行的连续过程生产的复杂大系统<sup>[1~5]</sup>。

生产计划与调度的科学化是连续性生产过程实现一定限度的生产柔性的关键。由于连续性生产过程具有高度复杂性, 必须将生产工艺机理的建模同系统工程理论紧密结合起来, 去寻找解决这一问题的最佳方法。实践结果表明, 基于全流程模拟, 结合应用线性规划、非线性规划或动态规划的方法建立计算机辅助生产计划与调度系统, 实现优化排产和优化调度是一个有效的途径。

流程工业涉及的部门十分广泛, 如石化、电力、冶金、造纸和医药等。单纯提高生产装置的控制水平, 寻求局部最优的投入产出比, 远远高于提高整体调度水平的投入产出比。特别是随着我国改革开放, 从计划经济过渡到市场经济, 流程工业生产中的管理决策、生产调度、过程控制等发生了重大变化, 面临着许多新的问题。例如, 在计划经济条件下, 过程控制与生产调度关系不大, 一般只考虑单一品种、满负荷生产、稳定工况条件下的线性最优控制。而在市场经济条件下, 产品品种的频繁变换、生产量随市场的波动以及产品质量与价格的竞争力等, 使得过程控制优化要与生产调度相结合, 实现多品种、变负荷、变工况条件下的动态生产调度和过程优化控制<sup>[3~5]</sup>。

流程 CIMS, 作为 CIM 哲理在流程工业中的体现, 综合信息技术、计算机技术、自动化技术、管理技术及系统工程等多种先进技术, 实现了企业中多种要

素和多个过程的集成优化运行,改善了企业生产环境、经营环境和管理决策水平,成为流程工业未来发展的必然方向。流程工业基础自动化水平相对较高,据专家预测,在流程工业中实现综合自动化所取得的经济效益和社会效益,会比离散工业的 CIMS 的效益更明显和迅速。

流程工业 CIMS 是在计算机网络和数据库基础上的递阶结构的大系统,如图 1.1 所示<sup>[3~5]</sup>。生产计划与调度居于 CIMS 五个层次的中间,是控制与管理一体化的接合部,上面是负责整个企业经营战略决策的决策层,下面是生产过程的监督控制层。因此,生产计划与调度是实施 CIMS 的关键,无论是理论研究,还是应用系统的开发都受到学术界和企业界的关注。

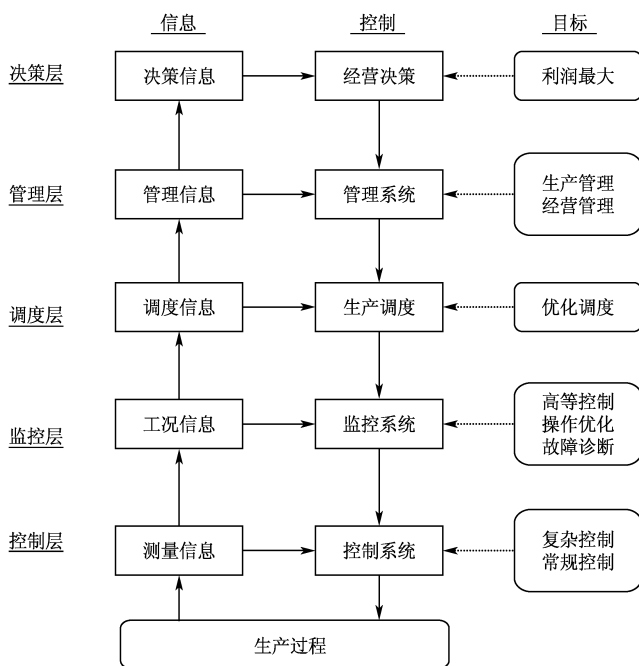


图 1.1 CIMS 多层次、多模式、多视图的结构模型

## 1.2 生产调度系统的功能与特点

### 1.2.1 生产计划/调度的任务

生产计划 (production planning) 是企业生产经营活动的主要依据,对企业的效益起着十分重要的作用,生产计划的制定以企业的利润最大化为目标,以适应市场动态多变需求为基础,主要包括年度计划、季度计划和月度计划等,计划

的周期可以根据市场等情况的变化随时做出调整。

生产计划的制定主要是根据产品的市场需求、原料的供应情况、企业的生产能力、装置的检修情况,综合考虑企业的管理成本以及生产过程中成品、半成品的成本等,利用物料平衡数据、物料物性数据等进行平衡分析,根据不同的生产状态和计划类型模型,运用线性规划等方法对企业的生产经营进行优化设计,辅助计划人员完成年生产计划、季生产计划和月生产计划的编制,给企业领导提供相关预测和决策信息,确保企业的利润最大。

企业的生产活动是按照生产计划进行的。生产计划是根据企业内部的生产能力和环境、外部市场的情况以及企业长期发展目标等因素,对企业生产发展及年度和季度经营做出的决策,以及市场对产品需求和原料供应具体情况及预测,并根据生产装置的运行情况,编制季度及月度生产计划,合理地安排计划期内企业生产的产品品种、数量和完成的期限,充分地利用企业的资源,包括时间、设备、劳动力、原材料和能源等,保证按时完成订货合同,满足用户的要求,提高企业的效益。

生产计划优化系统可以通过建模进行完整/局部模拟,不仅可以得到企业级的优化生产计划,还可以对每个生产装置或者各个生产环节分别提供经济评价和数据分析。可以提供原料的选择评价,优化原材料的选择;可以为装置的技术改造方案和扩建方案做出评价,快速进行多方案选择;可以利用现有的生产能力,优化组织生产;可以方便地进行计划制定、项目管理、物流管理、计划统计,有效地管理整个企业的人、财、物等各类信息。简单地讲,计划优化系统可以根据企业的生产、营销、管理的状况,以企业经济效益为目标,建立相对应的数学模型,运用线性规划求解,针对不同的原材料、产品结构、市场情况制定最优化的生产计划。计划优化系统的实施,可以充分利用现有的资源,优化资源配置,提高生产决策的科学性,优化全公司的生产,提高效益,增强市场竞争能力。

生产计划的制定,一般是考虑静态情况,只有在生产因素比较稳定和比较理想时才能达到优化的预期目标。

生产计划的实施由生产调度 (production scheduling) 系统来完成。生产调度层根据经营决策层制定的长期生产计划,分解为便于执行的短期计划,如五日或双日滚动计划,结合生产装置运转的情况,针对工艺切换以及生产设备的运转、原料供应及储运、资源波动等情况,进行合理的分配与安排,协调从原料、能源供应、生产到产品发货的各工序环节,对生产过程进行平衡与控制,并及时调整偏差,以达到生产过程连续不间断,降低生产成本,获得最大利润的目的。

生产调度的任务是在满足装置设备和工艺要求的条件下,根据市场的需求,合理地、最佳地安排与组织生产过程,以提高过程系统的操作最优性,为企业带来显著的经济效益。内容包括:

- (1) 产品的生产批数和批量。
- (2) 使用的设备链/线。
- (3) 产品的生产顺序和时间安排。
- (4) 资源限制等。

生产过程是动态的,当一些因素发生变化,例如原料供应延误、产品发货期变化、能源供应不足、设备出现异常情况等等,还有外部因素,如市场需求波动、运输不力等,都会影响到生产计划的完成。因此,要求生产调度系统有一定的柔性,能适应生产过程中各种内部和外部的扰动因素,准确而灵活地完成生产计划。

生产调度与生产计划具有某种程度的类似,都是对生产过程的规划与控制,主要区别是考虑的时间尺度不同。因此,在理论研究领域,生产计划与调度都称为调度问题。生产计划主要涉及产品的需求以及为生产该产品所需要的资源的粗分配,可以不考虑实际生产约束或者采用简化的方法粗略地考虑生产能力的约束。生产计划侧重于经营计划和生产能力的平衡,考虑的时间范围为中长期,如月或者年。而生产调度则是在较短的时间内进行,最主要的任务是生产作业的安排与资源的具体分配,涉及实际生产环境的各种约束。生产调度侧重于生产装置的分配利用和物料平衡等细节,考虑的时间范围为短期,一般为周或月。这样,问题的复杂性可以适当降低<sup>[6,7]</sup>。因而,生产调度同时又是生产计划的可行性验证过程。

### 1.2.2 生产调度系统的功能分析

生产调度系统的功能包括计划分解、动态监控和统计报表三个方面。

#### 1. 生产计划的分解

生产调度系统将生产计划合理地分解,编制成便于操作的短期计划。计划分解包括静态计划分解和动态计划分解。静态计划分解是在正常生产条件下,对具有充足的原辅料供应和广阔的销售市场的产品,可以根据选定的目标函数进行分解,一般采用按时间平均分配法。这种方法简单、有效、实用,被广泛应用。动态计划分解又称为滚动计划,是在生产装置加工能力以及生产保障系统状况、生产工艺流程要求、公用工程供应能力以及其他生产保障系统变化的情况下,遵循上级生产管理层制定的月生产计划,在生产现状信息反馈的基础上,选择如生产装置出力最大、以销定产、稳定满负荷生产等为分解原则,把月生产计划动态地分解成两日或五日不等的滚动作业计划,以便实施和执行。

## 2. 动态监控

为保证生产能安全、稳定、协调地运行并处于最好状态下,必须对整个生产过程进行动态监控,其内容包括实时监控、平衡协调与动态调度。

(1) 实时监控。通过数据采集系统、工业控制计算机系统或集散系统,将生产流程各生产装置中的控制变量与操作变量的实时测量值,生产设备中与辅助设备的状态,关键参数的历史趋势图,全厂范畴内生产运行的总体状况,各单元间的物流,以及全厂关键设备的异常工况及报警等,以图、表、工艺流程图等形式显示出来,便于调度人员对生产情况进行监视。

(2) 平衡协调。平衡协调好各项生产经营活动,使企业各部门间建立良好的配合关系,克服各种矛盾和冲突,从而保持生产过程的连续性、平稳性、经济性,有效地实现企业的目标。协调工作有两个方面,一是外部协调,即协调好生产和经营两大系统,重点协调好产、供、销、运活动,保证产、供、销三者的平衡,为生产系统提供必需的原料,保证销路通畅,为平稳生产创造有利的外部条件。二是内部协调,即让生产过程内部协调配合,以保证各个生产阶段,各个装置之间的物料平衡,使物料流在流动过程中相互衔接,同时还应维持公用工程中水、电、汽、风的供需平衡。

(3) 动态调度。在生产发生未预期事件使实际进度与调度进度表不符时,对原调度进行修改、调整,以维持生产性能最优的任务。当然,为维持生产进度表在动态环境中平滑推进,在对“未预期”事件作出实时响应时,一般采用受“未预期”事件影响最小目标函数,对生产进度表进行实时在线的调整,以最终消除执行中的偏差,保证优化表的执行。

### 1.2.3 生产调度系统的特点

生产调度问题是非常复杂的问题。通常是多约束、多目标、随机不确定优化问题。求解过程的计算量随问题的规模呈指数增长,已被证明是 NP 完全问题(non-polynomial complete problems)<sup>[8]</sup>。

生产调度问题所共有的特点:

(1) 复杂性。从原材料到产品,各操作任务相互影响、相互作用,由于产品工艺的多样性和环境条件的不确定性,随着调度问题规模的增加,求解调度问题所花费的时间是呈指数性增加,而非多项式性增加,在计算量上导致 NP 完全问题<sup>[9]</sup>。即使比较简单的流水车间作业调度问题,也是与城市距离不对称情况下的旅行商问题(traveling salesman problem, TSP)难度相当的同类型的问题。

(2) 随机性。生产装置处理时间的不确定性、设备故障的偶发性及物料运输的随机性,使得调度问题成为随机优化问题。采用动态再调度可在一定程度上克

服随机性带来的影响。

(3) 多约束性。生产资源(能量、原料、设备)的数量、缓存容量、产品的交货日期以及产品的工艺流程等都是约束。

(4) 多目标性。调度的目标很多,如最短生产期、最大生产利润、最小提前/拖期惩罚等,这些目标之间往往有抵触,使各个目标都最优是不可能的。目前的优化目标常常是多目标的综合考虑,包括成本目标、资源利用率目标、利润目标等。

虽然流程 CIMS 源于离散 CIMS,但由于流程工业与制造业有着明显的不同,因此流程 CIMS 不能等同于离散 CIMS。与离散 CIMS 的调度问题比较,流程工业生产调度问题还具有如下特点:

(1) 流程工业工艺过程连续,工艺流程固定。一般不需要离散 CIMS 中的 CAD/CAPP/CAM 等一系列计算机辅助技术,生产过程主要通过调整工艺参数、控制设定、选择适当的控制算法等达到安全、稳定、均衡、长周期、满负荷、优质、高产、低耗和减少污染的目标。

(2) 流程工业生产过程复杂。包括了信息流、物质流、能量流,而且伴随着复杂的物理化学反应、生化反应、相变反应等过程,以及突变性和不确定性等因素,同时流程工业生产系统中生产数据复杂,数据量大,在线检测困难,是一个十分复杂的大系统。

(3) 物流特点。物流的传送、处理及存储均以物流形式,生产装置间的连接有管道约束。

(4) 存储方式。由于化工过程的原料和中间产品的物理性质及化学性质与一般制造业有明显不同,必须考虑在过程的连续步骤间的存储策略。

(5) 流程工业的生产强调生产过程的整体性。流程工业的生产是连续的,因而,要求把不同装置和生产过程连接在一起成为一个整体。各个设备的优化不等于全厂处于最优,因而在求取全局最优的过程中有时会得到相互冲突的结论。

(6) 流程工业中离散决策变量与连续决策变量共存。系统内既包括连续过程变量,如生产过程;也包括离散过程变量,如生产方案的切换、调度指令的下达、随机事件的引入、生产装置的切换等,所以连续过程的生产计划/调度系统是混杂系统。

(7) 流程工业生产的安全性最重要。流程工业关键设备少而大,常常处于十分恶劣的生产环境,因而生产的安全性被放在最重要的位置,为保证流程连续稳定安全生产,故障诊断与设备维护在流程 CIMS 中也很重要。

由于上述特点,流程工业生产调度更加复杂。特别是对生产调度方法的实时性、协调性和可靠性提出了更高的要求。因此,从物料单(BOM)等一系列离散变量概念出发,生成的物料资源规划(MRP)、制造资源规划(MRP II)、企

业资源规划（ERP）等优化生产计划/调度的方法及模型基本上不再适用。必须根据连续过程的特点，构筑新的寻优思路及框架。

## 1.3 生产调度问题的描述

### 1.3.1 生产调度问题

生产调度问题是在一定的时间内，进行可用共享资源的分配和生产任务的排序，以满足某些指定的性能指标<sup>[9,10]</sup>。简单地说，生产调度问题就是按时间分配资源来完成任务的问题。

生产调度问题一般可以描述为：针对某项可以分解的工作，在一定的约束条件下，如何安排其组成部分（操作）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。

影响调度问题的因素很多，正常情况下有：产品的投产期、交货期（完成期）、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，这些都是所谓的约束条件。有些约束条件是必须要满足的，如交货期、生产能力，而有些达到一定的满意度即可，如生产成本。这些约束在进行调度时可以作为确定性因素考虑。而对于设备故障、原料供应变化、生产任务变化等非正常情况，都是事先不能预见的，在进行调度时大多作为不确定性因素考虑。

生产调度中涉及的工厂资源包括：原料、设备（加工、存储、运输）、人力、资金、能源等。资源的详细分配受到产品的生产工艺的限制。

生产调度的性能指标可以是成本最低、库存费用最少（减少流动资金占用）、生产周期最短、生产切换最少、三废最少、设备利用率最高等。实际生产调度的性能指标大致可以归结为三类：

（1）最大能力指标。包括最大生产率、最短的生产周期等，它们都可以归结为在固定或者无限的产品需求下，最大化生产能力以提高经济效益。在假定存在连续固定需求的前提下，工厂通过库存满足产品的需求，因此，调度问题的主要目标为提高生产设备的利用率、缩短产品的生产周期，使工厂生产能力最大，因此，这类生产调度问题可以称为最大能力调度问题。

（2）成本指标。包括最大利润、最小化运行费用、最小投资、最大收益等，其中收益指产品销售收入、运行费用包括库存成本、生产成本和缺货损失。

（3）客户满意度指标。包括最短的延迟，最小提前或者拖后惩罚等。

在传统的调度中，一般以平均流通时间最小、制造周期最短、满足交货期为调度目标，而在实际生产中，由于提前完成的产品必须保存到交货期，而拖期产品必须交付违约金，因此，在实际调度中更加重视提前或者拖后惩罚调度。

调度问题受到工厂管理方法的影响,在不同的管理方法下,调度问题的优化目标、优化策略及其优化数学模型均不同。几乎每一个生产环境都是唯一的,很难用一个生产环境的调度方案,去解决另一个生产环境的生产调度<sup>[11,12]</sup>。由于生产环境的动态性,生产领域知识的多样性,调度问题的复杂性,必须将人、数学方法和信息技术结合起来研究生产领域的管理调度问题。

调度问题也是一个优化问题。优化问题可以自然地分为两类:一类是连续变量的问题;另一类是离散变量的问题,称为组合优化问题 (combinatorial optimization problem)。对于连续变量的优化问题,一般是求一组实数或者一个函数;而在组合优化问题中,是从一个无限集或者可数无限集中寻找一个对象,它可以是一个整数、集合、排列或者一个图。

生产过程一般按照其输出的产品是呈现连续的产品流、离散的批量、离散的数量三种情况,分为连续生产过程、间隙生产过程和离散生产过程。

在离散生产过程中,产品通常是分批(原料相同、加工工序相同的一组产品)制造的,一定数量的产品作为一个工件组,并且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生产过程。

在连续生产过程中,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。一个连续生产过程输出的产品是连续的产品流。

间隙生产过程又称为批处理过程 (batch process),是由一个或者多个按一定顺序执行的操作步(或者操作阶段)组成。这些操作步是离散的,而每步中的过程是连续的。间隙生产过程一般包括若干个通用设备,多个产品在有限个设备上生产。

相应地,生产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或者称为批处理调度问题。

调度问题一般有以下三种分类方法<sup>[13]</sup>:

(1) 根据设备环境可分为:

开放式车间 (O): 不特别给定某一技术顺序;

流水车间 (F): 给定技术顺序,但不能预知任务;

作业车间 (J): 给定技术顺序和任务,但每项任务都不同。

(2) 根据任务特点可分为: 允许作业中断; 作业处理时间全部相等; 处理时间不限制等。

(3) 根据某一最佳标准来分: 总作业时间最小、总延迟时间最小等。

### 1.3.2 车间调度问题

车间调度问题一般可以描述为:  $n$  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。每一台机器在每个时刻只能加工某个工件的某道工序, 而且只能在上道工序加工完成后才能开始下一道工序的加工。前者称为占用约束, 后者称为顺序约束。

车间调度问题的决策内容包括分配决策(工件的加工顺序)和时间决策(工件各工序的加工时间)以及路径决策(工件各工序的加工设备的分配)。

车间调度问题的特点是多个工件在有限的机器上加工, 每台机器在切换不同工件生产时需要一定的准备时间。切换加工次数增加有利于减少工件的库存, 但导致生产率下降。因此, 需要在库存成本和工件切换加工频率之间取得平衡。生产的柔性体现在设备使用和设备安装两个方面, 设备使用的柔性是指设备可用于多个工件的多个工序的加工; 设备安排的柔性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, 可以通过将若干机器组织为一条或者多条生产线加工一种工件, 使得该工件生产率最大<sup>[10, 14~16]</sup>。

车间调度问题的另一类研究集中于柔性制造系统(FMS)。FMS由一系列数控设备组成, 数控设备能够单独加工多个工件, 在选择待加工工件后, 所需刀具必须分配到该设备的工具集中。FMS问题包括: 工件选择分配、设备分组、生产率确定和设备负荷、工具分配等问题, 它的约束包括设备工具集的容量限制、设备可用时间和设备负荷等<sup>[17~19]</sup>。

### 1.3.3 流水车间调度问题

流水车间调度问题(flow-shop scheduling problem, FSP)一般可以描述为:  $n$ 个工件在  $m$  台机器上加工, 一个工件分为  $k$  道工序, 每道工序要求不同的机器加工。 $n$ 个工件在  $m$  台机器上的加工顺序相同, 工件  $i$  在机器  $j$  上的加工时间是给定的, 设为  $t_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ )。调度问题的目标函数是求  $n$  个工件的最优加工顺序, 使最大流程时间最小。

对流水车间调度问题常常作如下假设:

- (1) 每个工件在机器上的加工顺序相同, 且是确定的;
- (2) 每台机器在每个时刻只能加工某个工件的某道工序;
- (3) 一个工件不能同时在不同机器上加工;
- (4) 工序的准备时间与顺序无关, 且包含在加工时间中。

**【例 1.1】** 多台机器加工多个工件的最优加工次序。

假设有 A、B、C、D 四种工件, 都需要进行先车后铣, 其加工时间如表 1.1 所示。其中, A、B、C、D 是调度问题中的 4 个工件(或者称为作业), 车床和铣床为 2 台机器, 分别为  $M_1$  和  $M_2$ , 车和铣为两个工序(或者称为操作), 分别为工序 1 和工序 2。

表 1.1 车、铣加工时间

工件名称	车床工时/h	铣床工时/h
A	15	4
B	8	10
C	6	5
D	12	7
合计	41	26

在调度中，一般用三元组  $(i, j, k)$  表示工件  $i$  的工序  $j$  在机器  $k$  上加工。如果按照  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$  的次序加工，则加工进度即工序加工随时间分配的顺序，可以用甘特 (Gantt) 图或称为条形图表示为图 1.2。

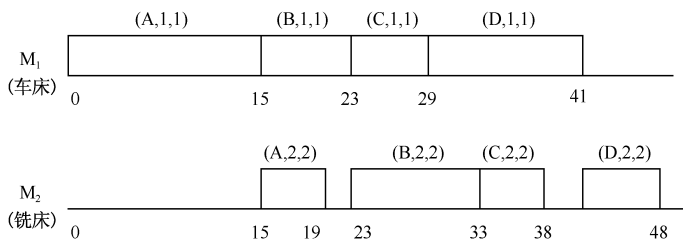


图 1.2 A → B → C → D 次序加工的 Gantt 图

图 1.2 中，方框表示操作，方框长度表示操作  $(i, j, k)$  的加工时间  $t_{ijk}$ 。

在 Gantt 图上，一种可行的调度应确保方框位置满足工序优先顺序要求，并且方框之间不发生重叠。生产调度的目的是找出总加工时间最短的 Gantt 图。对于上面这个生产任务，如果将加工顺序改为  $B \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow A$ ，则相应的 Gantt 图如图 1.3 所示。可见，原加工方案的总加工时间为 48h，而新加工方案的总加工时间为 45h，所以，比原方案优越。

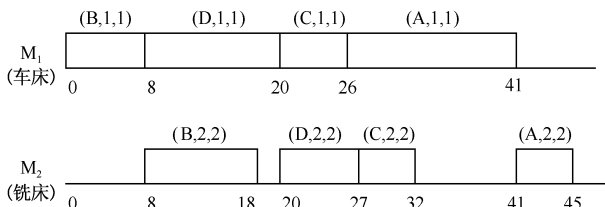


图 1.3 B → D → C → A 次序加工的 Gantt 图

如果某一给定的工件在一台或者多台机器上的加工时间为 0，则称为广义流水车间调度问题，否则称为纯流水车间调度问题。在过去的 30 多年里，多数研

究工作集中于纯的确定型流水车间调度问题，常用  $n/m/F/c_{\max}$  表示，即  $n$  个工件/ $m$  台机器/流水车间/最大流程时间。综述文章参见文献 [20]。

流水车间调度问题可以分为：确定型、随机型和模糊型。在确定型流水车间调度问题中，假定工件的加工时间是已知的确定量；在随机型流水车间调度问题中，加工时间按照一定的概率分布<sup>[20]</sup>；在模糊型流水车间调度问题中，每个工件的交货期是一个模糊数，表示决策者对工件完工时间的满意度<sup>[21,22]</sup>。

在实际工业生产过程中，往往存在多条相互独立的生产线，分配到某一生产线的产品不能再转移到另一条生产线上生产，称为并行 Flow-shop 调度问题。多数实际调度问题都可以简化为并行 Flow-shop 调度问题，其决策内容分为两部分，一是组合部分，即产品在各条生产线上的分配和各生产线上的产品生产顺序；二是连续部分，即各条生产线上产品运行时间和生产循环周期<sup>[23]</sup>。

### 1.3.4 作业车间调度问题

作业车间调度问题 (job-shop scheduling problem, JSP) 可以描述为：给定一个工件的集合和一个机器的集合，每个工件包括多道工序，每道工序需要在—台给定的机器上非间断地加工一段时间；每台机器一次最多只能加工一道工序；调度就是把工序分配给机器上某个时间段。问题的目标是找到最小时间长度的调度。

JSP 是一类满足任务配置和顺序约束要求的资源分配问题，是最困难的组合优化问题之一。资源和任务分别是一些机器和作业。作业可由若干称为操作的子任务组成。已知每个任务中诸操作在机器上加工的优先顺序和所需时间，要求给出作业调度，使得目标函数值（如总的加工时间最短或机器最长加工时间最短等）达到最小。与 FSP 相比，由于 JSP 的每个工件的加工工序可以是不同的，所以，JSP 比 FSP 更加复杂。

作业车间调度问题的目的是对作业进行有效的排序，因此，将作业定义为某个产品的某个工序，该问题的数学问题描述为：

设生产系统生产  $n$  个工件（产品），表示为集合  $N=\{1, \dots, n\}$ ，生产系统内有  $m$  台机器，表示为集合  $M=\{1, \dots, m\}$ ，每个工件需要经过若干道工序完成，若  $O_{ikq}$  表示第  $i$  个工件的第  $k$  个工序在第  $q$  台机器上加工的工序，其开始加工时间和需要加工的时数分别记为  $S_{ikq}$  和  $T_{ikq}$ ；工件  $i$  的最后一道工序的开始加工时间和需要加工的时数分别记为  $S_{ie,q}$  和  $T_{ie,q}$ ；工件  $i$  的投料时间和交货期分别记为  $r_i$  和  $d_i$ ； $P_i$  是工件的有序工序对  $[O_{ikp}, O_{ikq}]$  集合，其中， $O_{ikp}$  优先于  $O_{ikq}$ ； $R_q$  是使用机器  $q$  的所有工序  $O_{ikq}$  的集合。如果目标函数为最小化最大完工时间，或者最小生产周期，即如何安排加工使得加工所有产品的时间最短，则 Job-shop 问题可以采用整数线性规划模型描述为

$$\text{Min } J = \text{Max}(S_{ie,m} + T_{ie,m}) \quad i \in N \quad (1.1)$$

$$\text{s. t.} \quad S_{ilq} - S_{ikp} \geq T_{ikp} \quad [O_{ikp}, O_{ikq}] \in P_i$$

$$k, l \in \{1, \dots, m_i\} \quad i \in N \quad (1.2)$$

$$S_{ilq} - S_{ikp} \geq T_{ikq} \quad \text{或} \quad S_{ikq} - S_{jlq} \geq T_{jlq} \quad [O_{ikq}, O_{jkq}] \in R_q$$

$$i, j \in N \quad q \in M \quad (1.3)$$

$$r_i \leq S_{ijq} \leq d_i - T_{ijq} \quad i \in N \quad q \in M \quad j \in \{1, \dots, n_i\} \quad (1.4)$$

其中，式 (1.2) 表示工序顺序约束，而且，同一工件的不同工序不能同时加工；式 (1.3) 表示资源约束，每台机器同一时刻只能加工一个工件；式 (1.4) 表示投料时间和交货期约束。

上述问题作了以下的假设：所有的任务在零时刻都是可用的，并且无设备故障。任务在机器上执行的时间事先已知。

**【例 1.2】** 多台机器加工多个工件的最优加工次序。

假设有 3 种工件，在车床 (M<sub>1</sub>)、铣床 (M<sub>2</sub>)、刨床 (M<sub>3</sub>) 3 种设备上加工，其加工顺序和加工时间如表 1.2、表 1.3 所示。一种调度方案的 Gantt 图如图 1.4 所示。

表 1.2 加工顺序

工件	加工顺序		
	1	2	3
1	M <sub>3</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>
2	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>1</sub>
3	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>3</sub>

表 1.3 加工时间

工件	车床工时/h	铣床工时/h	刨床工时/h
1	4	2	7
2	3	5	6
3	2	4	3

对于作业车间调度问题，已经提出了许多最优化求解方法，但由于 JSP 是一个非常难解的组合优化问题，多数现有的最优化算法都只适用于规模较小的问题。

作业车间调度问题被证明是属于 NP 难题，在数学界公认是最困难的组合优化问题之一<sup>[8]</sup>，目前提出了许多启发式算法解决简单的作业车间调度问题。这些方法包括 Giffler 和 Thompson 算法<sup>[24]</sup>和瓶颈移动方法<sup>[25]</sup>。但至今为止，尚未有保证性能的启发式算法，只有在一些特殊的场合才适用。很多研究表明，寻找作

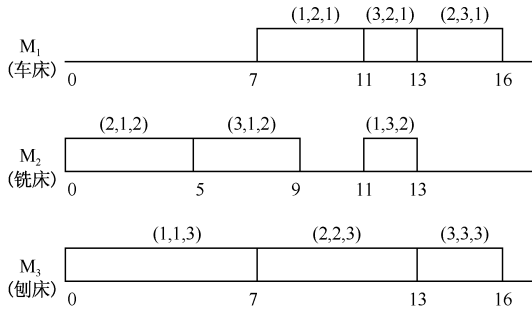


图 1.4 Gantt 图

业车间调度问题的最优解是非常困难的，最有工程意义的求解算法是放弃寻找最优解的目标，转而试图在合理、有限的时间内寻找到一个近似的、有用的解。

作业车间调度问题是一个资源分配问题，这里的资源是设备。通常，约束的数目很大，使得 JSP 成为一个最困难的组合优化问题之一。已经有许多用于求解作业车间调度问题的最优化方法，包括神经网络<sup>[26~28]</sup>和拉格朗日松弛法<sup>[29]</sup>，但这些算法只适用于规模较小的问题。由于其本身的难处理特性，通常采用启发式算法。多数传统的启发式算法采用优先权规则。所谓优先权规则是在一个从未排序的工序特定子集中选用工序的规则。

近年来，概率的局域搜索方法成为求解 JSP 的重要算法，如模拟退火 (SA)<sup>[15]</sup>、禁忌搜索 (TS)<sup>[30]</sup>、遗传算法 (GA)<sup>[31]</sup>。

### 1.3.5 间隙生产调度问题

与连续生产过程相比，间隙生产过程的一个重要特点是它们的全部生产活动及经济效益很大程度上依赖于生产过程的计划与调度。由于多产品之间存在时间及资源共享，为达到总体最优的生产目标，必须协调原材料及中间在制品 (work-in-process) 因素的影响；资源限制，如劳动力、存储能力以及最大可用公共资源 (如水、电、煤气、冷却水等)；合适的生产周期及批量大小，设备维护及故障时间，长期需求预测等问题<sup>[32~35]</sup>。

间隙生产过程按其产品生产工艺的相似程度分为两类：多产品 (multi-product) 间隙生产过程和多用途或者多目的 (multi-purpose) 间隙生产过程。

在多产品间隙生产过程中，所有产品都是按照相同的操作顺序生产的，通过同样的加工路径，整个生产过程分为若干个生产阶段，每个阶段内包括若干个并行生产设备，每个产品都需要按顺序经过所有的生产阶段，所有产品的处理步骤都相同。多产品间隙生产过程类似于 Flow-shop。

而在多用途间隙生产过程中，每个产品可以在一条或者多条生产线上生产，

而不同的产品的生产流程线是不同的。产品可能经过过程中的不同路径，且对不同的产品具有不同的加工路径。一种产品有几条加工路线，各个产品的生产工艺不相同，同一产品生产存在多个备选生产路径，其生产路径不是预先确定的，可以通过设备的组织安排来调整<sup>[36]</sup>。多用途间隙生产过程类似于 Job-shop。

多产品间隙生产过程的调度主要有两个方面：一是产品生产批量的个数和大小的确定，二是产品完成时间的确定。产品完成时间的确定不但受到产品的最终需求量和产品的交货期的影响，而且也受到设备的加工能力、存储条件和作业切换时间等影响。

多用途间隙生产过程的调度除了多产品间隙生产过程调度的两个方面外，还存在排序问题。因为同一产品可以在多条路径上的具有相同性质的加工单元上加工，所以，除了批量加工时间外，还有加工任务（批量）的排序问题。

在间隙生产过程中，不同性质的中间产品需要不同的中间存储策略<sup>[34, 35, 37~39]</sup>。常见的中间存储策略分为：无限中间存储（unlimited intermediate storage, UIS）；有限中间存储（finite intermediate storage, FIS）；无中间存储（no intermediate storage, NIS）（设备自身存储）；混合中间存储（mixed intermediate storage, MIS）。

成品与原料一般为无限存储。不稳定中间产品必须是零等待（zero wait, ZW），采用无中间存储，而稳定中间产品可以采用 FIS 策略。由于中间产品的存储能力往往是有限的，导致各个生产阶段存在与产品顺序相关的等待时间；不同的产品在某设备上生产加工时间不同，在设备上切换加工产品所需要的时间也与产品生产的顺序相关。因此，需要同时考虑等待时间、加工时间与切换时间的影响，通过选择产品的生产顺序，使得所有产品的生产周期或者产品生产循环时间达到最短。

注意，存储能力是以存储设备的数量，而不是以设备的几何尺寸来度量的。这是因为在化工过程中，每个存储设备同时只能存储一种产品。在 NIS 和 ZW 模式中，各步骤间没有存储。在 UIS、FIS 和 FTW（finite time wait，有限时间等待）模式中，一批产品在一台设备上完成操作后，可以暂存在该设备上，而在 ZW 模式中，产品则必须立即送到下一台设备上继续进行处理。

Jung 等（1994）研究了多产品多阶段生产过程中，不同中间存储策略下的最短生产周期调度，其决策内容为产品的生产次序和完成时间<sup>[40]</sup>。Pinto 等（1994）研究了多阶段连续生产的多产品工厂调度问题，工厂包括多个生产阶段，每个阶段内仅有一条生产线，各个生产阶段之间由存储设备连接，其决策内容为产品的生产次序、生产循环周期和循环周期内各个产品的生产时间以及中间存储设备的库存<sup>[41]</sup>。与此类似的研究见文献 [33, 37~39, 42, 43]。

由于多用途工厂存在多条生产线，每个产品具有多条加工路径，因此，除了

产品生产顺序和时间决策外, 还有任务设备路径决策。Tsirikis 等 (1993) 将多用途工厂的调度问题分为两层: 上层进行生产路径组织, 将订单分配到各个时间段生产; 下层进行设备与资源分配决策<sup>[44]</sup>。Papageorgiou 等 (1993) 采用一个单层的 MINLP 优化模型, 同时考虑多用途工厂的生产计划与生产调度问题, 生产计划确定各个生产时间段的长度和安排生产的产品; 生产调度确定设备任务分配和时间决策。它同时考虑了产品需求、原料供应以及资源供应变化的影响, 并将模型扩展到半连续生产过程<sup>[45]</sup>。

### 1.3.6 动态调度问题

生产调度分为动态调度和静态调度两大类。静态调度是在已知调度环境和任务的前提下的所谓事前调度方案。在实际生产过程中, 虽然在调度之前进行了尽可能符合实际的预测, 但由于生产过程诸多因素难以预先精确估计 (如处理单元和物料等资源的变化、操作处理时间的变化), 往往影响调度计划, 使实际生产进度与静态调度的进度表不符, 需要进行动态调整。特别是在市场经济条件下, 没有一种预测方法能够完全预测生产过程的动态变化。事实上, 由于市场需求变化会引起产品订单变化, 例如产品数量的变化, 交货期的变化等, 另一方面, 生产设备故障, 能源的短缺, 加工时间的变化等, 都可能使原来的调度不符合实际要求。

为了适应实际生产过程的不确定性和随机性, 一般采用周期性调度和再调度相结合的策略, 定义一些关键事件, 如设备故障等, 当关键事件发生时, 立即重新调度, 否则周期性调度<sup>[19]</sup>, 即进行所谓的动态调度 (dynamic scheduling), 或者称为再调度 (rescheduling)。动态调度是指在调度环境和任务存在着不可预测的扰动情况下的调度方案, 它不仅依赖于事前调度环境和任务, 而且与当前状态有关。

动态调度有两种形式: 滚动调度 (rolling scheduling) 和被动调度 (reactive scheduling)。滚动调度是指调度的优化时间随着时间推移在一个接一个的时间段内动态进行生产调度。被动调度是指当生产过程发生变化, 原来的调度不再可行时所进行的调度修正。

被动调度是在原有的静态调度的基础上进行的, 因此, 它的调度目标是尽量维持原调度水平, 性能指标下降越小越好。滚动调度既可以在原有的静态调度的基础上进行<sup>[46]</sup>, 也可以直接进行<sup>[19]</sup>, 其最终目的都是在当前优化区域内得到最优或者近优调度。

动态调度必须符合实时性要求, 所以更关心在线计算能力问题。为了能够在有效的时间内得到一个较为合理的调度, 一般希望将问题的规模减少, 在一个时间段较小的问题空间内得到一个较好的解答, 因此, 大多数采用启发式方

法<sup>[46~49]</sup>和基于预测的滚动优化方法<sup>[19,50~52]</sup>。

动态调度大多数是由于加工时间的变化引起的<sup>[46]</sup>，少数是由于订单的变化和设备故障等引起的<sup>[47]</sup>。对于由于加工时间的变化引起的动态调度，由于其批量和加工顺序一般是根据最早的最优（或者可行）调度设定好的，因此，在这种情况下，一般不再需要重新分配批量和加工顺序，只是调整各加工任务的加工起始时间，尽量得到一个近优的调度，或者保持原有调度的性能指标。

Cott 和 Macchietto (1989) 研究了加工时间变化的情况下，多产品批处理化工厂的被动调度性能<sup>[53]</sup>。他们通过检测实际调度和目标调度之间的差别，向前或者向后移动各未完成产品的加工任务的起始加工时间，以尽量减少加工时间的变化对目标调度的影响。但他们只处理了当前加工时间的变化，没有考虑各个任务之间的等待时间约束，以及将来可能的加工时间的变化。Ishii 和 Muraki (1996) 则考虑了将来可能的加工时间的变化，给出了两种时间修正策略，以处理各种不同的时间约束和未来的瓶颈任务<sup>[46]</sup>。该调度调整算法的特点在于考虑了各个任务之间松弛时间的插入，以尽量吸收以后加工时间变化引起的时间调度。调度修正算法只是作为一个子模块，受到上一层调度系统的控制。当现有的松弛时间插入算法不能求得可行解时，由上层调度算法考虑批量调整或者再排序问题。所以，该调度调整算法的前提是上层调度算法能够在有效的时间内产生一个最优或者近优甚至只是可行的调度。

由订单变化和和设备故障引起的再调度问题，至少会引起部分加工顺序的变化，原有的加工批量一般保持不变，重点调整加工时间。

滚动调度的滚动优化区域的设定和预测模型是非常关键的。滚动优化区域的设定主要由优化算法的计算速度和调度的实时性决定，既可以将时间区域段作为划分标准<sup>[19]</sup>，也可以将加工任务数作为划分标准<sup>[46]</sup>。预测输出一般为产品的完成时间<sup>[47]</sup>，决策变量则为一些加工任务的起始加工时间和加工单元的安排<sup>[52]</sup>。

滚动调度虽然不是全局最优调度，但由于实时性好，能够适应动态的调度环境，所以，更好地为实际生产所接受。滚动调度需要准确的预测模型，但在实际生产中难以得到，所以，如何利用调度专家经验指导调度问题的建模和求解，成为重要的研究方向。

Kim 等 (1996) 提出了一个基于规则的再调度系统，处理 Multi-purpose 型生产过程中的不可预料事件，它由动态监视模块和重调度模块两部分组成，动态监视模块通过偏差评价函数进行监视，当生产与调度计划发生偏差超限时，触发重调度模块在简单平移、装置重配、工序重排三类规则的指导下进行调整，以适应生产情况的变化<sup>[54~56]</sup>。

Ko 等 (1997) 对多阶段无中间缓冲 (NIS)、并行装置生产类型进行了研究，提出了动态平移调整法 (DSMM)、并行单元操作法 (PYOM) 和单元有效

检测法 (UVVM) 等动态重调度策略<sup>[57]</sup>。其他还有: 最小影响启发式搜索方法<sup>[47]</sup>、滚动优化调度<sup>[52]</sup>、最小影响和最小 Makespan 双目标的柔性过程动态 Reactive 调度<sup>[58]</sup>。

## 1.4 生产调度方法

### 1.4.1 优化方法与启发式方法

虽然对生产调度问题的研究已经有几十年的历史, 提出了一大批调度方法, 但至今尚未形成一套系统的理论与方法, 已有方法可归结为优化调度方法和启发式调度方法两大类。

优化调度方法通过精确求解解析模型获得最优解, 或通过近似求解获得次优解。优化方法是从全局的角度出发, 在所有的装置、操作任务和感兴趣的时间段内进行搜索, 能够得到优化解。

优化方法建立在数学规划基础之上。尽管数学规划方法比较成熟, 但只能有效地解决小规模优化问题。对于复杂的大规模生产调度问题, 随着装置数和任务数的增加, 感兴趣时间段的增长, 其解析模型的规模急剧增大, 求最优解往往是 NP 难题, 一般优化方法难以求解, 而启发式方法在这方面显示了很大的优越性。

启发式调度方法包括基于规则的方法、基于人工智能的方法、随机搜索方法、基于仿真的方法。启发式方法是从当前角度出发, 根据决策点时刻装置、任务所处的状况进行调度, 保证了局部最优, 但难以保证全局最优。

启发式算法大多基于启发推理, 根据决策时刻的装置、任务所处的状况进行调度, 保证局部最优。Kudva 等 (1994) 在考虑订单的优先级和减少切换成本的情况下, 采用启发式方法对具有有限中间存储的多产品批处理和半连续企业产生调度方案<sup>[59]</sup>。Wu 等 (2003) 提出了一系列基于启发式的不同分解方法, 包括基于时间的分解、基于需求生产方法的分解和基于资源的分解, 通过基于启发式方法获得的下界和基于拉格朗日松弛 (LR) 和拉格朗日分解 (LD) 获得的上界, 对大规模调度问题如炼油厂调度产生有效的方案<sup>[60]</sup>。Spokes 等 (1996) 解决了流程工业中聚丙烯生产的调度问题, 利用启发式方法产生调度问题的次优解, 通过实际数据测试该启发式方法进行比较, 从而证明了该方法的有效性<sup>[61]</sup>。Al-Khayyal 等提出了基于分解技术的树型搜索启发式方法, 应用于平板玻璃生产调度中<sup>[62]</sup>。

启发式方法与优化方法比较, 各有利弊。事实上, 两类方法有很大程度的互补性, 将两类方法有机结合进行研究, 将会成为今后研究的热点。

### 1.4.2 数学规划方法

从数学规划的角度,生产调度问题可以归结为在等式约束或者不等式约束下,对一个或者多个目标函数的优化,可以表示为 MILP 或者 MINLP 优化模型,采用各种数学规划方法求解。数学规划方法是隐含枚举整个空间的搜索方法,搜索效率低,难以解决大规模的调度问题。尽管 MILP 形式理论上能提供调度问题的最优解,但求解实际问题的计算量太大。

传统的求解 MILP 的方法是分支定界法 (branch and bound, B&B),它是求解组合优化问题的为数不多的有效方法之一。为了提高求解效率,采用了各种改进 B&B 算法<sup>[63]</sup>,或者简化计算技术<sup>[64]</sup>。

为了求解 MINLP 问题的全局最优解, Kocis 等 (1988) 提出一种基于外部逼近的两步法<sup>[65]</sup> (outer approximation method, OA); Floudas 等 (1989) 提出一种广义 Bender 分解法,但这两种方法只适用于具有某种特殊结构的非凸 MINILP 问题<sup>[66]</sup>; Diaz 等 (1996) 运用 OA 法求解实际优化调度问题<sup>[67]</sup>; Mockus 等 (1999) 基于贝叶斯启发方法,运用 MRP 规则启发式近似求解;也有人将 MINLP 转换成一组 MILP 问题进行求解<sup>[68,69]</sup>。Lagrangian 松弛法 (王朝晖等, 1997), 在一定程度上减少了求解时间<sup>[70]</sup>。

Harjunoski 和 Grossmann (2001) 提出了使用数学规划方法的分解策略解决大型调度问题,即使用分解策略产生小的程序来解决全局优化问题<sup>[71]</sup>。Roslof 等 (2001) 提出了一种基于 MILP 的新算法,成功应用于造纸和制药企业的调度问题中<sup>[72]</sup>。Lundgren 等 (2002) 利用 MILP 方法处理了炼油厂的调度问题<sup>[73]</sup>。Ietapetritou 和 Floudas (1998) 提出了一种新的基于连续时间表示的 MILP 数学模型的算法,能够显著地减少变量总数,从而有效地减少计算时间<sup>[74]</sup>。数学规划方法能得到调度问题的全局最优解或最优解的界,但该方法对较大规模问题很难在有效时间内获得解,问题的微小变化也可能使算法失效,所以建立合理的数学模型是使用数学规划方法的前提和关键。

采用数学规划的方法,表达清晰,易于在计算机上求解,但生产环境具有很多不确定性因素,存在建模不确定性和求解空间太大的问题,造成计算困难,特别是不能反映特定调度领域的自然结构,所以很难应用经验知识去处理调度问题<sup>[75,76]</sup>。

### 1.4.3 规则调度方法

规则调度是指系统运行时,根据一定的规则和策略来决定下一步操作的调度方法。它是动态调度的典型代表,它的优点是直观、简单实用,且花费的求解时间较少、易于实现,在实际生产中获得了广泛的应用。产生式规则系统是生产调