

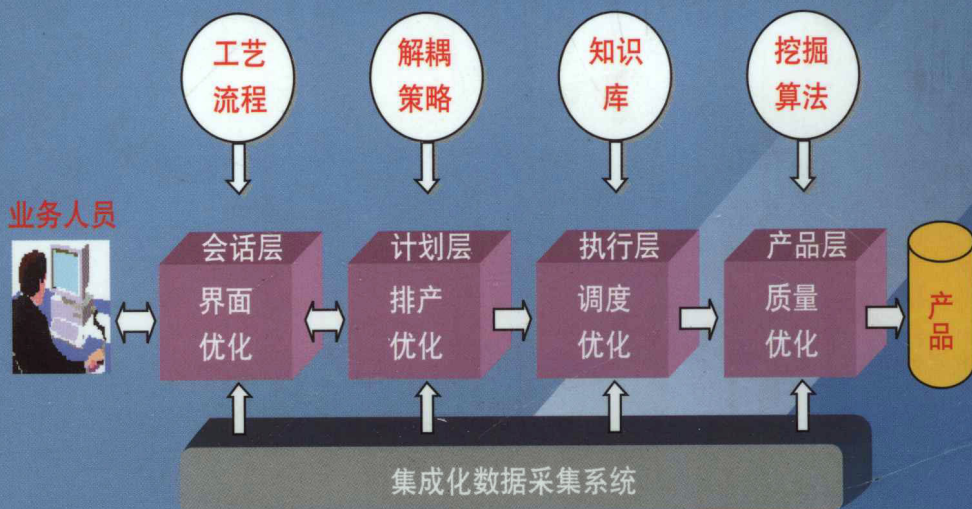
国家十五863计划项目资助

(2001AA413410)

THE TECHNOLOGY OF INTELLIGENT PLANNING AND SCHEDULING
FOR PROCESS ENTERPRISES

流程企业智能计划调度技术

罗焕佐 宋国宁 王晓峰 等著



NEUPRESS
东北大学出版社

国家“十五”863计划项目资助

(2 0 0 1 AA 4 1 3 4 1 0)

THE TECHNOLOGY OF INTELLIGENT PLANNING AND SCHEDULING
FOR PROCESS ENTERPRISES

流程企业智能计划调度技术

罗焕佐 宋国宁 王晓峰 等著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 罗焕佐 等 2004

图书在版编目 (CIP) 数据

流程企业智能计划调度技术 / 罗焕佐, 宋国宁, 王晓峰等著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2004.8

ISBN 7-81102-076-9

I. 流… II. ①罗… ②宋… ③王… III. 流程管理—生产调度 IV. F273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 083001 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳市光华印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

幅面尺寸: 170mm × 228mm

印 张: 12.125

字 数: 238 千字

出版时间: 2004 年 8 月第 1 版

印刷时间: 2004 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 1~2000 册

责任编辑: 刘 莹

责任校对: 文 玉

封面设计: 唐敏智

责任出版: 秦 力

定 价: 22.00 元

内 容 简 介

本书从分析生产工艺与计划调度特征着手,全面而深入地研究了流程企业生产系统的优化组织问题,以分布式人工智能、Multi-Agent 系统、数据挖掘、知识发现等为主要理论基础,提出了实现计划调度优化的“综合物流”思想、“智能解耦”策略及“调合优化”模型,突出了“智能化”核心思想。全书共分 6 章,从总体结构、计划排产优化、动态调度优化、产品质量优化等不同侧面和角度,阐述了流程企业计划调度技术的概念内涵、模型算法及软件实现技术,对有效建立流程企业制造执行系统,丰富和发展流程企业综合自动化整体解决方案,全面提升我国流程企业的核心竞争力和经济效益,具有重要的促进作用。

本书可供炼油、化工、电力、钢铁、制药等流程行业从事生产运作管理及信息化技术研究开发的专业技术人员与企业管理人员参考使用,亦可作为相关高等院校师生的教材或教学参考书。

前 言

流程企业包括石油、化工、制药、钢铁等行业，亦称为过程企业，主要通过原料的混合、分离、粉碎、加热等物理或化学处理过程而使原料增值。随着计算机与信息技术的不断进步，建设流程企业综合自动化系统受到普遍关注；开展流程企业综合自动化技术专题研究，提出整体解决方案，促进我国过程自动化软、硬件产业全面发展，被列为国家高技术研究发展计划（简称 863 计划），现代集成制造系统技术主题（简称 CIMS 主题）的重点内容之一。事实上，问题的关键在于如何运用信息技术改善企业的生产运作与组织管理，以提高企业的核心竞争力。在当前激烈的竞争环境下，全面、及时地掌握市场信息，提高生产效率，降低成本，对流程企业的生存和发展至关重要。计划调度系统是企业生产活动的组织和管理中心，是提高企业综合效益的一种有效方法。在过程自动化系统三层结构研究中，过程控制系统（PCS）起步较早，而制造执行系统（MES）和企业资源规划系统（ERP）则相对滞后。生产计划与调度系统是流程企业制造执行系统的核心，亦是整个综合自动化集成系统的重要组成部分。计划调度系统要在保证生产过程安全、稳定的前提下，将企业资源规划系统的经营决策等管理信息传达到过程控制系统生产过程中，同时，将生产过程的控制信息反馈到企业资源规划决策系统中。计划调度系统在实现物流、资金流、工作流、信息流等过程流集成优化的基础上，在整个企业综合自动化集成系统中起着承上启下的关键作用。因此，研究流程企业计划调度优化技术，具有十分重要的科学价值。

研究表明，采用排产优化系统将为流程企业带来可观的经济效益。以大型石油化工企业为例，通常都有数十套乃至上百套生产装置，物流线路错综复杂，年处理原油数百万吨至上千万吨，产品可达百余种，产值达数十亿乃至上百亿元。对于这样复杂的流程企业，计划制订是生产管理的关键，因而亦是一件艰巨而复杂的工作。在计划经济时代，生产计划以上级下达指标为依据，凭计划人员的个人经验尚能应付；但在市场经济形势下，原油价格、成品油价格等各种生产制约因素随时都在变化，必须适应市场变化，及时调整生产计划安排及调度实施策略，以保证获得最佳的经济效益。

当前,我国流程企业存在着许多影响市场竞争力的问题,而其中最主要、最关键的问题是企业仍然采用传统的经营管理模式。从技术角度来看,许多传统排产计划系统虽然有不同的优势特点,所用的数学方法亦很严密,但过分强调整体优化,对装置参数的依赖性很强,而参数却在不断变化之中,导致优化方案的鲁棒性较差,实际应用效果不理想,缺乏对实际生产过程变化的应变能力。从集成角度来看,企业信息技术应用还处于单项开发阶段,缺乏系统集成思想和有效支持手段,生产调度不能及时获取所需的信息。因此,必须研究更先进的生产计划与调度技术,开发综合集成的生产计划与调度系统模型,使得管理信息能够及时传递到生产执行系统,生产信息亦能够实时反馈到管理系统,消除过程系统集成的狭缝,缩短产品生产周期,提高企业竞争力。

综上所述,系统的“适应性”和“实用性”是目前流程企业计划调度问题的瓶颈所在;必须另辟蹊径,利用信息化技术,建立直观、易懂、鲁棒性强的计划排产与调度实施方案,以优化生产组织,快速提高流程企业的核心竞争力,这是我国加入世界贸易组织后,流程企业应对挑战的重要前提。为此,本书作者在国家“十五”863计划基金资助下,以石化企业为具体应用对象,面向流程行业,全面分析了企业生产过程的组织及计划调度系统的基本特征,深入研究了生产计划与调度问题的模型框架及求解技术,从系统结构、建模优化、智能求解等方面,提出了流程企业计划调度创新技术,为流程企业生产的优化组织与运作管理提供了方法论的指导。

本书是国家“十五”863计划课题的研究成果,着重阐述了流程企业计划调度的核心思想、总体结构、建模优化技术、智能求解技术、产品质量模型优化计算、调度优化中的数据挖掘以及智能计划调度系统的软件实现技术。本书是写作组集体智慧的结晶,罗焕佐为写作组组长,统筹规划了全书的目标定位、写作大纲、适用范围,撰写了第1章、第6章,以及第2章、第4章的部分内容,审阅了全部书稿;宋国宁为写作组副组长,撰写了第3章,以及第2章、第4章的部分内容;王晓峰为写作组副组长,撰写了第5章,以及第2章、第4章的部分内容;贾勇参与了第2章部分内容的撰写;刘晓参与了第4章部分内容的撰写;王霆参与了第5章部分内容的撰写;王玉参与了第6章部分内容的撰写。

值得一提的是,计划调度技术是一项极富挑战性的研究;流程企业作为研究对象,其生产过程复杂多变,存在诸多制约因素,难于在本书这样一本专题性学术著作中作详尽描述。因此,书中难免存在纰漏甚至谬误。然而,越来越多的专

业技术人员和企业管理人员开始关注这项技术，并加入其中进行潜心研究，的确令人欣慰。我们可以乐观地预见，这项技术必定会逐渐走向成熟，为流程企业的发展提供必要的技术支撑。

在本书的写作过程中，得到过许多研究机构、院校、企业和个人的大力支持，在此表示衷心感谢！特别要感谢博士研究生秦绪伟为本书提供了许多宝贵的资料与素材，感谢东北大学出版社对本书给予的关注与支持。正是由于这些热心人士的帮助，本书才得以如期出版，以飨读者。

罗焕佐

2004年3月于沈阳

目 录

前 言

1 绪 论	1
1.1 流程企业集成生产的总体需求	1
1.1.1 生产流程分析	1
1.1.2 流程企业发展的关键问题	3
1.1.3 集成优化的总体需求	3
1.2 流程企业的计划调度	5
1.2.1 计划调度问题的一般描述	5
1.2.2 计划调度的基本特征	8
1.2.3 计划调度的地位与作用	9
1.2.4 计划调度系统的现状与瓶颈	10
1.3 流程企业计划调度技术的发展方向	11
1.3.1 经典方法	11
1.3.2 现代方法	16
1.3.3 几种主要模型算法的比较	17
1.3.4 未来的发展方向	18
2 智能计划调度总体技术	21
2.1 智能计划调度体系结构	21
2.1.1 流程企业计划调度的典型结构	22
2.1.2 中心化计划调度的一般结构	26
2.1.3 智能计划调度的总体结构	27
2.2 计划调度的基本过程流	29
2.2.1 生产过程中的物流模型	30
2.2.2 生产过程中的资金流模型	32
2.2.3 综合物流模型	35
2.2.4 盈利网络模型	39
2.3 智能计划调度的基础支撑技术	42
2.3.1 技术支撑框架	42

2.3.2 智能表述方法	43
2.3.3 数据管理技术	48
2.3.4 网络传输技术	54
3 智能排产优化技术	58
3.1 概 述	58
3.2 流程企业的基本物流模型	59
3.3 工艺关联矩阵	64
3.4 一类典型流程企业的综合物流模型	66
3.5 盈利系数矩阵及物流分配矩阵	74
3.5.1 盈利系数矩阵	74
3.5.2 物流分配矩阵	75
3.5.3 瓶颈向量	76
3.6 基于解耦策略的智能优化方法	78
3.6.1 解耦策略	78
3.6.2 氯碱企业计划优化	80
3.6.3 炼油企业计划优化	84
3.7 最优切割	90
4 动态调度优化技术	95
4.1 概 述	95
4.2 生产系统的运行优化	96
4.2.1 运行优化的基本原理	96
4.2.2 运行优化中的信息处理与控制策略	98
4.3 调度优化中的平衡问题	102
4.3.1 基于物料状态的平衡	102
4.3.2 基于加工过程的平衡	103
4.3.3 综合平衡	104
4.4 面向供应链的调度优化算法	104
4.4.1 问题的基本描述	105
4.4.2 准时化采购调度数学模型	106
4.4.3 模型的求解算法	108
5 产品质量优化技术	110
5.1 概 述	110
5.2 产品质量模型与质量优化方法	111

5.2.1 产品质量模型化的主要方法	111
5.2.2 产品质量优化方法	113
5.3 汽油调合优化技术	114
5.3.1 汽油辛烷值模型	115
5.3.2 调合优化的基本原理	118
5.3.3 多目标的配方优化	119
6 智能计划调度的软件实现技术	129
6.1 概 述	129
6.2 结构设计	131
6.2.1 系统主流程	131
6.2.2 功能结构	133
6.2.3 数据流程	147
6.3 对象设计	150
6.3.1 分布对象的技术特性	150
6.3.2 对象设计方法	152
6.3.3 计划调度系统的主要对象	154
6.4 界面设计	154
6.4.1 界面设计的基本思路	154
6.4.2 系统界面的动态优化	156
6.4.3 主要程序界面的设计	159
6.4.4 集成平台设计技术	172
主要参考文献	177

1 绪 论

1.1 流程企业集成生产的总体需求

1.1.1 生产流程分析

流程行业主要包括石油、化工、制药、冶金、造纸、建材、轻工、采矿、环保等，其生产过程与离散制造业不同，一般为批量连续生产，主要通过对原料的混合、反应、分离、粉碎、加热等物理或化学处理过程，使原料增值。根据工艺流程特点，流程行业可以划分为连续型、间歇型(亦称为半连续型)、混合型三类。以石油化工企业为例，其生产工艺流程是确定的，主要生产过程包括原料储运、加工处理、中间产品及产成品储运等，属于典型的、连续型长流程制造企业。

流程行业生产工艺流程的基本特征概括如下：

① 流程企业是能耗高、服务面广、配套性强、资金及技术密集的重要基础产业部门，生产批量大、生产周期短，新产品研制开发周期长、投资大；

② 产品是均一性物料，而非物品，从原料供应到产品输出，是一个稳定的、连续的加工过程，各个中间环节相互关联、相互制约，而原料在生产加工过程中，通常起着极为重要的作用；

③ 生产品种依赖工艺流程与设备，主要原料品种单一且相对稳定，而产品种类数量多，属于典型的 V 型企业；

④ 生产过程的柔性及动态优化是通过改变生产装置的物流分配来实现的；

⑤ 生产计划确定后，主要生产任务是控制、调整工艺参数，降低能耗，提高产品质量；

⑥ 生产过程控制系统与装备一次性投资大，多数运行在高温高压、易燃易爆、有毒有害的环境下，在生产中，有废弃物生成，存在环境保护问题，安全与故障诊断要求高；

⑦ 以安全、稳定、低耗、柔性、质量、收率等为生产管理与控制的重点优化目标，对过程自动化和管理信息化水平要求较高。

下面以石油炼化企业为例，简要分析流程企业的生产过程。

以物流过程为主线，石油炼化企业的生产过程一般可以分为原料储运过程、

加工处理过程、产成品储运过程等三个主要环节。其中,原料储运过程包括海上运输、管道输送、码头罐存、炼油厂罐存等主要工序,此时,生产计划调度主要关注的是原油采购优化问题;产成品储运过程包括半成品、中间产品、最终产品在炼油厂内的储存、运输以及向用户发运等工序,主要涉及库存优化及产品销售优化问题;加工处理过程是整个生产过程的重点环节,亦是实施计划调度优化的关键,本书将作详细分析。一般地,加工处理过程以常减压为龙头装置,原油被分离为石脑油、汽油、航空煤油(常一线)、柴油(常二线)、常压三/四线,减压一/二/三/四线及渣油,以 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 表示(图 1.1)。这些油品又可根据原料性质、产品质量要求等因素,在多条加工路线中,选择不同的分配方案,通过分配管线到达相关的加工装置,进行深加工,生产出燃料油、三苯、润滑油、石蜡、沥青、石油焦、重油等最终产品,以 $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ 表示(图 1.2)。由此,自动形成多条基本并列的生产线,适合基于 Agent 分布式智能系统的求解策略。而通过龙头装置切割方案的调整,对分布式系统进行协调。

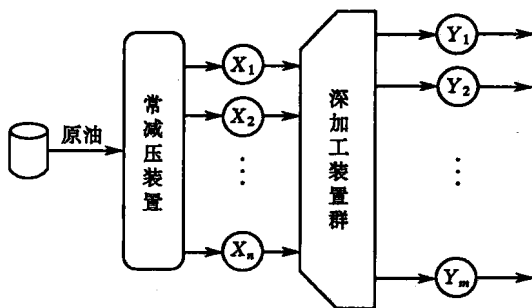


图 1.1 原油加工切割示意图

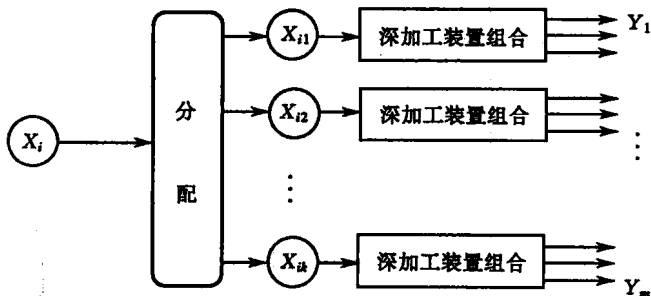


图 1.2 油品加工路线选择示意图

1.1.2 流程企业发展的关键问题

针对当前石油化工行业市场竞争的特点,本书重点分析了流程企业的传统经营模式、传统评价体系的构成要素以及流程企业内部的各种制约因素,研究了流程企业应该采取的竞争对策以及完善外部管理体制与内部管理机制的模式和策略。面临加入 WTO 的严峻挑战,我国流程企业存在着许多影响市场竞争能力的问题,而其中最主要、最关键的问题是企业仍然采用传统的经营管理模式,企业内部的管理层次过多、信息流通不畅、人浮于事,导致效率低下。企业决策时,历史数据不易查找,缺乏及时、准确的数据分析,导致决策速度慢或决策失误。例如,石油化工企业中,罐区原油库存和在途信息不能及时传递给生产计划部门,使计划决策偏离实际生产能力,造成加工过程不稳,资源浪费严重。从集成角度来看,石油化工企业信息技术应用还处于单项开发阶段,缺乏系统集成的思想和支持手段,信息技术应用没有与管理方式转变结合起来,企业的各种局域网互联程度低,形成了“自动化孤岛”,生产装置与调度之间缺乏有效的计算机网络支持,控制网络信息无法平滑地传送到管理网络,生产调度不能及时获取所需信息,凭经验指挥生产,无法最大限度地挖掘企业的潜力。

1.1.3 集成优化的总体需求

我国加入 WTO 后,原油、成品油与国际市场接轨,面对实力强大的竞争对手,我国石油化工行业已经认识到改善企业经营环境、提高企业综合实力的紧迫性。企业能否采用新技术,解决好影响企业发展的关键问题,实现由传统的生产管理模式向敏捷制造企业的转变,将决定一个企业的前途和命运。因此,石油化工企业为了提高生产能力、降低生产成本、增强市场竞争力,就必须全面提高企业管理的科学水平,使企业得以持续发展。流程企业综合集成有如下总体需求。

(1) 利用信息技术优化经营决策是流程企业持续发展之基础

石油化工行业是我国国民经济的支柱产业,具有规模庞大、连续生产、过程复杂、高温高压等特点,从战略高度出发,石油化工行业只有实现低投入、高产出的目标,实现适时投入、快速产出的目标,才能具备与国外著名石油化工公司竞争的实力。要实现这一目标,必须开发和建设综合集成系统,应用信息技术,优化生产经营管理和综合决策,为流程企业的持续发展提供支持。信息集成是贯穿整个集成系统的支撑条件,是综合集成的重要基础。为此,必须研究建立统一的信息编码系统,研究智能推理技术,建立相关模型库、方法库、知识库。同时,还必须研究信息的采集、加工、存储、传递、利用、反馈等全生命周期的集成方法。

(2) 以装置优化带动过程优化是实现企业整体优化之根本

严格地说,炼油装置的生产过程是串行和并行共存的。要将整个生产的加工装置统一作并行考虑,组成一个多装置、多储罐的工作组,使原料、半成品、成品在工作组之间的流动能够最大限度地满足装置运行,并在储运设施不变的情况下,提高储运能力。正确的加工安排可以最大限度地减少储运损失、加工损失以及装置能耗,同时,可最大限度地提高设备利用率。建立管理与技术的综合集成系统,则可以将从原油加工到产品销售,以至人员活动的全过程集成起来,使生产处于良性循环状态。借鉴并应用离散工业综合集成的并行工程、敏捷制造、精良生产技术,有助于流程企业实现整体优化,从而提高企业的综合竞争能力,准确把握并最终赢得市场竞争。

过程优化包括物流、资金流、工作流、信息流等过程流的优化。综合集成系统是一个十分复杂的系统,设备繁杂、产品关联度高、人员众多、组织机构庞大,且处于变动之中。从企业生产经营的运作过程来分析,可以分成三大运行系统,即由计划管理、生产调度、过程优化、先进控制等构成的生产系统,由供应管理、销售管理、财务管理等构成的经营系统和由综合查询、市场预测、决策分析等构成的决策系统。其中,生产是基础,没有优质、低耗的产品,企业就变成无源之水;经营是核心,企业的效益要靠经营系统去创造;决策是关键,企业在竞争中,只有靠正确的决策,才能立于不败之地。生产和经营是通过物流连接起来的。因为经营为生产提供原料,又将生产出的产品销售出去。伴随物流的发生,是资金的流动,包括流动资金与固定资产,资金在生产与经营之间不断循环并产生增值。在企业全部活动中,人是决定性因素,而人们之间的关系又是通过工作流相互连接起来。决策过程的信息流更是贯穿于生产、经营与决策之间。它一方面反映的是物流、资金流、工作流和质量流在企业中的流动情况,另一方面又有自己的各种属性。因此,要使企业能优化地运行,就必须将这些过程流进行优化,而这种优化仅仅是各系统孤立的优化,而是整体的优化。因此,过程流的优化是企业整体优化的核心问题,也是最根本的需求。

(3) 以技术优化促进管理优化是发掘企业潜能之关键

石油化工企业年加工原油及其他原料数量很大,加工环境变化也比较频繁,如何根据市场变化,制定并优化年度/月度生产加工计划及生产作业计划,具有很大的潜力。生产计划与调度是流程企业的核心,必须研究与开发“生产计划与调度集成优化系统”,使得管理信息能够及时传递到生产执行系统,生产信息亦能够实时反馈到管理系统,消除过程系统集成的狭缝,缩短产品生产周期,提高企业竞争力。

以技术优化促进管理优化的首要问题是必须建立综合集成的体系结构。传统体系结构的概念是指系统中各子系统之间的关系,缺乏对各视图间关系的描述。在综合集成系统中,必须研究和建立过程流及相关视图的描述,优化视图关联,

并在此基础上,实现管理优化,发掘企业潜能,促进管理模式的变革。因此,必须在分析与综合国内诸多石油化工企业机构建设和组织模式的基础上,建立能快速响应环境变化,具备自适应、自优化和可重构能力的流程企业管理模式的视图关联及方法与技术体系。

1.2 流程企业的计划调度

1.2.1 计划调度问题的一般描述

(1) 计划问题

计划问题是根据企业全年度的生产订单以及市场需求预测而编制生产、分销、采购和库存计划,关键在于解决生产资源的静态最优分配问题。流程企业的年度计划、季度计划等中、长期计划更具有重要性。年度生产计划和销售计划决定企业的物料平衡,即物料采购计划和生产计划的衔接。中期计划可以进一步分解为月计划、周计划等短期计划,以便及时更新库存、生产能力及其相关需求信息,使得采购、生产、分销协调顺畅。周志奎等研究了多周期混合整数规划模型在流程企业长期计划方案优化中的应用,根据原料、产品市场预测计划周期内的投资预算,建立了以计划周期内净现值为目标的模型,能够准确测算投资回报;王凯全等以石油化工行业为背景,建立了以原料供应量、系统物料产量、装置加工能力、装置经济运行、物料输入和输出配比、物料投入和产出比例为约束条件,以系统利润最大化为目标函数的面向市场的线性规划模型(Linear Programming,简称LP)。

流程企业计划问题主要采用混合整数规划模型,以支持多种计划方案的分析、评价,该类模型的主要约束条件如下。

① 生产能力约束。定义各装置或装置组合等单元过程的加工能力、设备故障或检修导致单元过程加工能力降低,以及各单元经济运行条件约束;

② 平衡约束。整个企业及各单元过程的物料、能量及其公共资源的平衡;

③ 原料供应约束。包括原料和能源可供消耗量、运输能力、库存容量限制;

④ 产品需求约束。主要有客户对产品的性能规格、需求数量、产品质量、交货期等约束;

⑤ 变量非负约束。所有变量必须满足非负条件。

流程企业的中、长期计划既要考虑规划周期内不同时间原料、产品市场的变化,又要考虑满足在不同时间投资额限制条件下的最优分配投资方案,使投资回报最大。因此,常采用规划周期内净现值最大为中、长期计划模型的目标函数,这样,可使装置新建或改造的固定投资、可变投资、运行费用、原材料费用等不

同周期的投入, 以及产品销售收入等产出, 都能按年利率折算到规划周期开始时刻的净现值。对于短期计划, 常采用生产利润最大或总体生产费用最小等基于经济的目标函数。

(2) 调度问题

流程企业的生产调度是根据计划阶段所规划的生产需求确定产品在装置设备上的加工顺序, 关键在于解决生产资源的短期动态最优分配问题, 以优化某些经济的或系统的性能指标。为了清晰、直观地描述流程企业的调度问题, 可以采用状态-任务网络图(State Task Network, 简称 STN)方法。与传统的流程图相比, STN 是描述复杂流程处理的有效方法, 适用于描述物料循环的批处理过程、半连续过程和连续过程。Condili 等首先提出用 STN 描述一般的化工批处理过程, 并建立了多目标批调度问题的混合整数线性规划模型 (Mixed Integer Linear Programming, 简称 MILP)。STN 具有较强的表达能力, 可以明确地表达任意复杂的处理网络, 成为表述流程企业复杂过程的常用方法。STN 图是由状态节点(State)和任务节点(Task)构成的有向网络图, 如图 1.3 所示。其中, 状态节点表示原料、中间产品或最终产品的初始库存和存储设备的能力约束, 任务节点表示当前任务采用的处理设备、批处理时间和最大最小批量, 该操作将一种或多种输入状态转化为一种或多种输出状态。两种节点分别用椭圆和矩形表示, 箭头表示物料流向, 其上的数字表示物料输出或输入的比例。因此, 在采用 STN 描述调度问题时, 需要给定各产品的生产流程、每个加工步骤可利用的设备及其处理能力、中间产品的存储设备及其存储能力、调度周期内各种可利用资源的数量、不同处理设备一个产品批次的处理时间、调度周期等, 调度模型必须确定各个周期内不同任务在同一设备处理的排序、每一个任务的处理时间、各个任务在生产设备上处理物料量的大小, 以达到平均生产总价值最大。

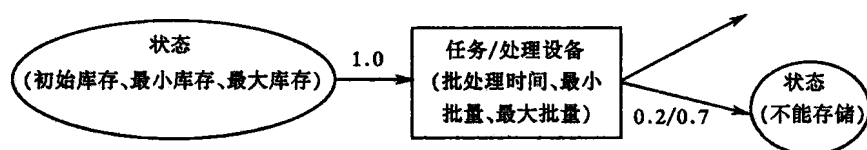


图 1.3 状态-任务网络图表示

基于当前流程企业的生产过程, Westenberger 和 Kallrath 给出了如图 1.4 所示的流程企业详细生产调度问题典型案例(即 W-K 问题), 以推动流程企业调度算法的研究。W-K 问题能够涵盖流程企业多阶段生产、多目的处理设备、可变批量、生产流程的分支和合并、非中断处理、中间产品共享、循环物流、生产配

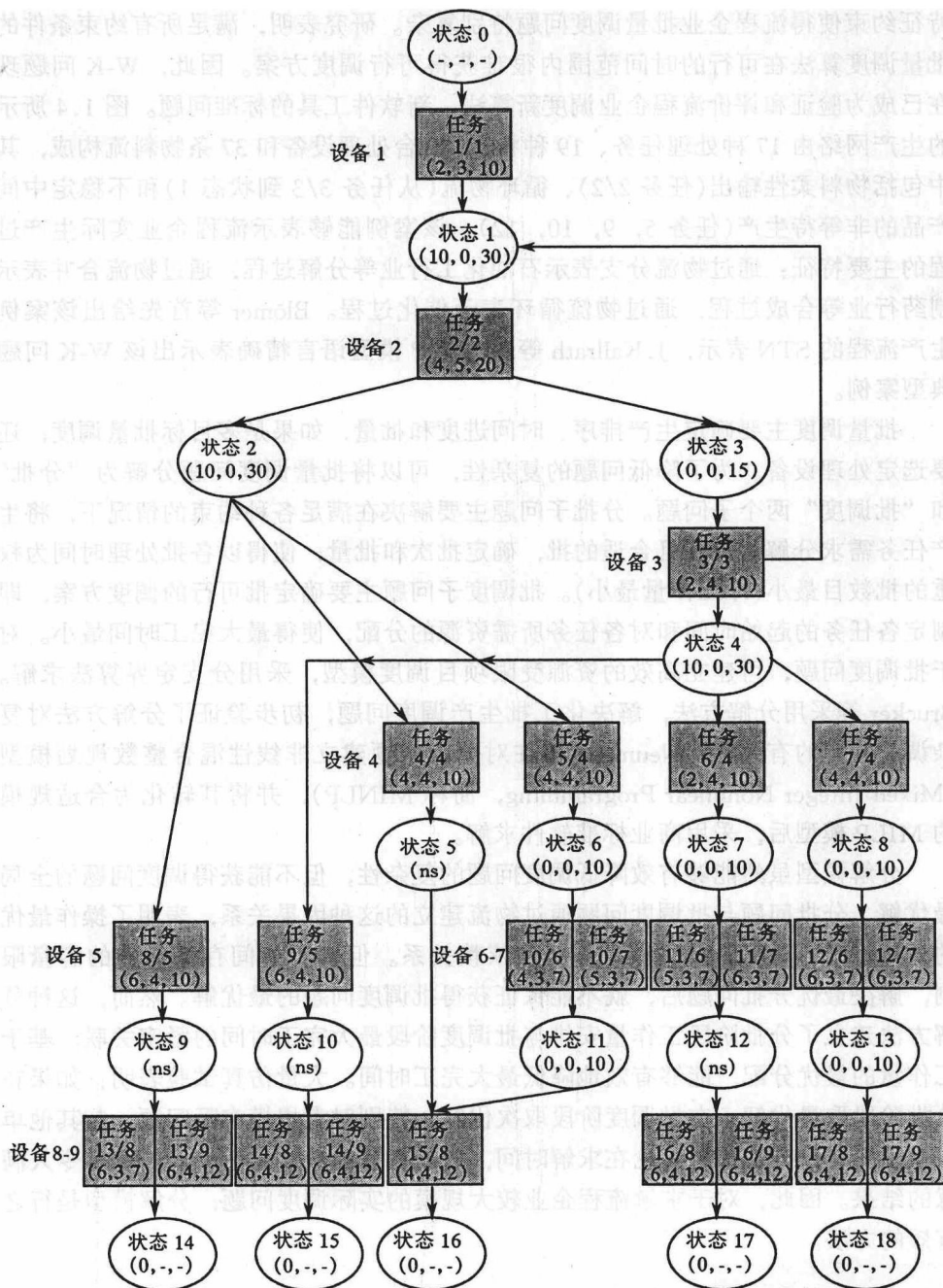


图 1.4 W-K 问题典型案例的状态-任务网络图