

文章编号: 1006-3080(2000)05-0441-06

不确定性条件下的生产调度

顾幸生

(华东理工大学自动化研究所,上海 200237)

摘要: 综述了不确定性条件下生产调度的研究现状,分析了生产调度过程中所存在的各种不确定性,阐述了不确定性的分类,不确定性的数学描述,不确定性生产调度的数学模型,各种调度方法,处理不确定性生产调度的优化方法等,指出了解决不确定性生产调度的有关途径,并对存在不确定性条件下生产调度的进一步的研究内容作了展望

关键词: 生产调度;优化;不确定性;重调度;在线调度;动态调度;鲁棒性

中图分类号: F273

文献标识码: A

A Survey of Production Scheduling under Uncertainty

GU Xing-sheng

(Research Institute of Automation ECUST, Shanghai 200237, China)

Abstract In this paper, the researches of the scheduling under uncertainty are summarized. The various uncertainties in scheduling are analyzed, the classification of uncertainties, the mathematical description of uncertainties, the mathematical models for scheduling and the optimization methods are studied in details. The various practical scheduling schemes have been investigated for the uncertainties. At the last, the further research fields for scheduling under uncertainty have been proposed.

Key words scheduling; optimization; uncertainty; rescheduling; on-line scheduling; reactive scheduling; robustness

流程工业企业中的生产调度一般可以分为三种类型:

(1) 资源的优化配置。企业在生产经营过程中对所拥有的各种资源进行优化配置,使企业在一定的资源约束条件下取得最大的经济效益

(2) 生产过程的应急调度。在企业的生产经营过程中,生产设备发生故障,物品的加工时间异常,生产的原材料、能源的短缺、由于市场存在着激烈的竞争使产品订单发生变化等等,是经常会发生的,在这种情况下,正常的生产过程可能会暂时中断,原先

的调度方案不能继续有效地实施。如何在这种情况下采取必要的调度措施,使生产能顺利地进行,并取得较好的经济效益,这就是应急调度的任务。

(3) 间歇生产过程的调度。间歇生产过程具有在同一条生产线上,在不改变物料流动路线的前提下,通过操作时间表与工艺条件的调整,可以生产不同规格的产品(Flowshop过程);或可以采用若干种固定的单元设备,通过物料及其流动路线、操作时间表和工艺条件的调整,生产出不同类型的产品(Job-shop过程),如何安排各产品的生产批量和生产顺序,使企业产生最大的经济效益,这就是间歇生产过程调度的目标。

生产过程中存在事先无法预料的不确定因素是不可避免的,为此,必须考虑存在不确定性情况下的生产调度问题,保证生产过程正常、满意地进行。

基金项目: 国家自然科学基金(69874012)、国家高技术研究发展计划(863-511-945-001)项目资助

收稿日期: 2000-04-27

作者简介: 顾幸生(1960-),男,江苏海门市人,教授,博士生导师,研究方向为控制理论与应用、生产计划与生产调度、复杂工业过程的建模、控制与优化。

1 生产调度中的不确定性

1.1 不确定性的分类

在企业的经营和生产过程中,会存在各种各样的不确定因素^[1~2],如产品的产量、原材料的价格和供应量、劳动力因素。每一道生产工序中产品的处理量、处理时间、中间存储单元的存储量、中间产品的稳定存放时间等都可能发生变化;生产中原材料或能源的暂时短缺也是不确定因素;另外,生产过程中往往会发生一些事先无法预料的突发事件,如生产设备的损坏、仪器仪表的故障、操作工的误操作等,这些不确定的因素往往会导致生产调度方案无法按预定的目标正常执行。企业经营和生产过程的不确定因素可以分为以下四类^[3~6]。

1.1.1 系统固有的不确定性 这类不确定性参数主要包括各种动力学、热力学常数和传热、传质系数等。由于实际工业生产工艺过程是十分复杂的,各种化学、物理、热力学等常数与实验室数据具有比较大的差别,或者这些数据本身就很难获得。这些不确定性,造成了对生产过程进行精确、有效地建模的极大困难,因而常常影响生产过程的控制水平和控制性能指标。

1.1.2 生产过程中产生的不确定性 这类不确定性主要包括生产过程中各种流体介质的流速、温度、压力等的变化和设备的处理能力。如在间歇生产过程中,各生产工序对各种物流的处理时间、某一设备的生产能力、中间产品的稳定存放时间等。这类不确定性往往影响生产调度系统的性能。

1.1.3 外部环境的不确定性 在市场经济体制的条件下,企业的生产不再是独立的行为,而是受外部环境的影响,产品的需求量、产品的价格、能源、原材料的供应以及其它外部环境因素构成不确定因素。这类不确定性往往影响生产计划和生产调度方案的正常执行。

1.1.4 离散不确定性 这方面的不确定性主要是设备的故障、仪器、仪表的失效、人工误操作等,或者是关键操作人员的短缺等。这类不确定性对企业组织正常生产会造成很大困难。

1.2 不确定性的描述

1.2.1 不确定性参数服从概率分布^[3~4,6~7] 应用随机变量来表示不确定的参数,根据对实际生产的历史数据的分析和对市场的预测,统计出不确定的参数所服从的概率分布。在许多情况下,采用随机变量描述调度系统的不确定性是一种有效的方法。如

处理时间(包括产品的加工时间、设备的清洗时间、原材料或中间产品的装载时间、传输时间等)的不确定性,我们可以通过对历史操作数据的分析研究,统计出某一产品在某一道工序中的处理时间服从某种统计分布规律。常用的概率分布有均匀分布、正态分布和指数分布。

1.2.2 不确定性参数处于某一区间^[8] 在生产实际中,要依据历史的操作数据分析、归纳出某一参数满足何种概率分布,有时是困难的。最简便的方法就是统计、整理出操作数据位于某个区间内。用区间表示方法来模拟参数的不确定性具有很大的适用性,如鲁棒控制理论中表示参数的不确定性一样。这时,不确定的参数可以表示为: $\theta_i \in [\theta_{i\min}, \theta_{i\max}]$, 其中 $\theta_{i\min}, \theta_{i\max}$ 为参数 θ_i 可能取值的下限和上限,这两个量可以通过对历史操作数据的分析整理获得。

1.2.3 不确定性变量为离散的值^[3,8~11] 这类不确定性主要是设备的故障、仪器、仪表的失效等,或者是误操作等。在数学描述上可以用一些离散的量来表示这类不确定性,但实际处理时往往采用动态反馈策略,一旦发生故障,及时进行检测,对调度模型重新进行优化计算,以确保整个调度方案的最优性。

另外,还可以应用模糊数学描述调度过程中的不确定性^[12~13]。

2 不确定性条件下的生产调度

2.1 不确定性生产调度的模型

2.1.1 不确定因素服从统计分布时的调度模型^[3,14] 此时模型如下:

$$\begin{aligned} \min_{c,x,d} E\{J(c,x,d,\theta)\} \\ s.t. \quad g(c,x,d,\theta) \geq 0 \\ h(c,x,d,\theta) = 0 \\ c \in C, x \in X, d \in D, \theta \in \Theta \end{aligned}$$

上述模型中, σ ($i = 1, 2 \cdots n$) 为决策系数,可以是产品 i 的单位成本系数,也可以是产品 i 的加工时间, x_i ($i = 1, 2 \cdots n$) 为决策变量,可以是待求的第 i 种产品的处理量,或其在某一工序中的完成时间, d_i ($i = 1, 2 \cdots m$) 为离散的量,用来表示仪器设备或仪表的故障等不确定因素, θ_i ($i = 1, 2 \cdots p$) 为不确定的参数,如表示处理时间、传输时间的不确定性,处理量的不确定性,或者中间储罐存储能力的不确定性等。

目标函数 J 可以是产品的加工成本、所有产品

的生产周期等,根据具体情况决定.由于采用了随机变量来描述不确定性,所以目标函数取数学期望形式. $g(c,x,d,\theta) \geq 0$ 和 $h(c,x,d,\theta) = 0$ 分别为过程的等式约束和不等式约束.

不确定性参数 θ_i 可以对工厂实际生产操作数据进行统计分析后获得,一般认为它服从某一分布,如正态分布,均匀分布或指数分布,可以是连续分布也可以是离散分布.

2.1.2 不确定性因素在某 一区间内变化时的调度模型^[7~8] 以下为此时的模型描述.

$$\begin{aligned} & \min_{c,x,d} J(c,x,d,\theta) \\ & s.t. \quad g(c,x,d,\theta) \geq 0 \\ & \quad \quad h(c,x,d,\theta) = 0 \\ & \quad c \in C, x \in X, d \in D, \theta \in \Theta \end{aligned}$$

与上面的模型不同的是,不确定的参数采用区间表示,即 $\theta_i \in [\theta_{i\min}, \theta_{i\max}]$,其中 $\theta_{i\min}, \theta_{i\max}$ 分别为不确定参数 θ_i 取值区间的下界和上界.此时目标函数 J 即为一般的非线性函数.

2.2 不确定性条件下的生产调度方案

2.2.1 鲁棒调度方案 生产过程中产生的各种不确定性(如产品的处理时间)对调度问题的目标函数的影响是不相同的,另一方面,不同的调度方案对不确定因素(如处理时间)的灵敏度是不相同的,所以,我们在制订调度方案时,针对生产过程中出现的不确定性,综合考虑目标函数的优化与调度方案的鲁棒性之间的矛盾,制订出满足实际需要的,具有鲁棒性的调度方案.

实际中,一般采用两种方法来实现鲁棒调度,一种是一次性调度方案,一种是 Reactive 调度方案.

Honkomp Mockus Reklaitis 等^[4~5]采用 Reactive 调度方案实现鲁棒调度,他们所建立的调度模型为确定性模型,但调度系统监测生产过程对调度方案的执行情况,将其反馈给调度器,一旦生产过程发生不确定的变化,如处理时间的变化,调度器及时修正调度策略,以保证整个调度系统的稳定性.他们采用 PLASTIC 和 BATCH4 仿真软件包进行仿真计算,研究了调度策略对调度系统性能指标的影响.李明切等^[7~8]采用随机变量描述处理时间的不确定性,将调度模型描述成随机规划问题,采用遗传算法进行寻优,取得了较好的调度效果.在调度过程中,如果对过程进行深入的分析研究,可以总结出一些规则,在调度过程中充分发挥这些规则的作用,对加快调度算法的寻优起到很大的作用,他们研究并比较了加入调度规则时对一条具有 8 个加工工序,生产 5 个产品的 Job-shop 生产线的调度结果,说明了调

度规则对减少优化计算量起到很大的作用.

一般地说,对于不确定因素变化频繁,但变化幅度较小的情况,应该采用鲁棒调度方案,一旦调度方案制订完成,只要不出现大的扰动,按此方案组织生产,能获得比较满意的结果.

2.2.2 适应性调度方案 对于不确定性因素变化幅度较大,如处理单元失效,重要的仪器仪表发生故障,处理时间大幅度改变,或者是由于市场的动荡而引起的需求量的大幅改变等这些未预期事件,此时应采取适应性调度技术.适应性调度可以分为重调度(Rescheduling)、滚动调度(Rolling scheduling)、动态调度(Reactive scheduling 或 Dynamic scheduling)、在线调度(On-line scheduling)等^[15~24].

对于未预期事件的调度问题,在柔性制造系统(FMS)中研究较多,研究的方法是重调度和滚动调度^[22,25~28].重调度可分为连续性和周期性两类.连续性重调度指当引起系统的状态变化的事件发生时,就立即进行重调度,因而能极快跟踪系统的变化,但计算量极大,对于复杂系统的实时性要求较难满足^[16,29~30];周期性调度指在间隔一定的生产时间后进行重调度,但在这段时间区间内,对“未预期”事件不敏感,积累该时间段内各种偏差,可能导致系统整体性能的恶化,其优点是计算量较小,易于实现在线重调度^[31~33].滚动调度则主要是借鉴预测控制的滚动优化的思想,跟踪系统的动态变化,可分为 Time-based 和 Job-based 两大类,但如何选择时间窗或工作窗的规模,针对具体的对象仍然是有待进一步研究的课题.

吴受章等^[34]应用自适应控制理论的思想,提出了一种 FMS 的模型参考自适应调度方案,并对 Job-shop 情况分别研究了建模、摄动计算、调度器设计等问题;Daeho 和 Moon^[11]研究了在操作单元失效情况下的重调度技术,他们针对 SP88 标准间歇生产过程讨论了 DSMM(Dynamic Shift Modification Method),PUOM(Parallel Unit Operation Method)和 UVVM(Unit Validity Verification Method)重调度技术,提出了时间调整因子 F 的概念,并以化妆品生产过程为实例,研究了这三种调度技术的应用.

间歇生产过程调度问题中的中间储罐的作用是相当大的,它可以增加生产过程操作的柔性. Lee 和 Reklaitis^[9~10]研究了在操作设备失效或进行维修的情况下,中间储罐的容量;王朝晖^[13]等研究了具有模糊缓冲库存约束的调度问题,采用模糊数学的方法研究不确定性,建立了模糊规划问题,然后用

Lagrangian 松弛法将模糊优化问题转化为一系列单一设备子问题和一个隶属度函数的优化问题

Ierapetritou 和 Pistikopoulos^[3, 35]在其发表的论文中,研究了不确定性条件下生产过程设计和调度的一体化问题。在进行生产过程最优设计过程中考虑了生产过程的调度问题,建立了二级(设计模型和调度模型相互关联的)随机规划模型,然后将其转化为一个优化问题,这样既增加了生产过程的操作性,又使生产过程在不确定情况下的调度能取得满意的结果

对于流程工业,由于具有复杂性和各产品任务间的强关联特性,对“未预期”事件的调度问题,无法照搬 FMS 的动态调度的方法,如滚动调度方法,对某些存在不稳定中间产品的生产过程,很难采用 Time-based 滚动调度方法,但可借鉴 Job-based 重调度策略,人们相应的提出了 Product-based 重调度策略。也有学者提出实时在线调度、Reactive 调度等方法^[2, 4~5, 36]。

2.2.3 智能调度方案 处理实际生产过程的不确定因素对调度系统的影响,人们根据人工智能原理,提出了智能调度方案。常见的智能调度方案主要有:专家系统、基于规则的调度方法、基于智能优化方法的调度以及几种调度方法的结合^[37]。Badell 等^[38]研究了基于实时网络知识对生产过程和资金的调度,并研究了信息集成技术。由于智能调度方法可以模拟人的思想,对生产过程出现的问题进行分析、推理,并作出重调度决策,所以智能调度对于处理不确定性具有独特的优势

自动控制系统中处理不确定性时,研究了系统的鲁棒控制、预测控制和自适应控制,以克服不确定性对系统的影响。在生产调度中,为了克服不确定性对调度方案的影响,借鉴自动控制理论的思想,研究具有鲁棒性的、具有预测功能和自适应能力的反馈调度策略,对于解决实际问题具有重要的意义

2.3 优化方法

对于生产调度,已有多种类型的建模和优化方法。采用数学规划理论如排队网络方法、线性规划、非线性规划、动态规划、混合整数线性规划等,采用 Petri 网、极小极大代数、时序逻辑等,取得了许多研究成果。然而流程工业的生产过程是高维对象,采用规划模型求解调度问题,随着维数的增加,计算量呈指数增长,因而为了提高求解效率,减少计算工作量,提出了不少基于规则的优化方法。如根据实际生产过程的特点,总结一定的调度经验,提出一些调度规则,对于提高计算效率起到了重要的作用;采用人

工智能的方法(如各种搜索的方法、专家系统的方法等)对于解决具体的调度问题,不仅可以简化问题,而且能获得合乎实际的满意解。近几年来,随着优化技术的发展,各种新颖的优化方法被应用到调度系统中去,如采用遗传算法、模拟退火算法、趋化性算法等,为获得全局最优解提供了可能性

3 研究展望

3.1 鲁棒性分析

企业在生产过程中存在的各种不确定因素(如产品的处理时间、处理量、设备的完好情况等)对生产调度问题的目标函数的影响是不相同的,如有的处理时间对目标函数的影响相当大,处理时间的微小变化会引起目标函数的显著变化;有的处理时间对目标函数的影响相当小,处理时间在某个范围内变化时,目标函数不变;另一方面,不同的调度方案对不确定因素的灵敏度是不同的。如何分析不确定参数的变化对目标函数的影响对于生产调度而言是十分重要的。在调度系统的鲁棒性分析方面,目前国内外已有不少学者开始进行研究,如 Chaudhuri 和 Diwekar^[39]、Samikoglu 和 Honkomp^[40]、李明切^[8]、顾幸生^[41~42]、Sanmarti^[43]等,采用的方法基本上是仿真方法和灵敏度分析方法,但研究还较少,也没有具有一般意义上的分析方法。对于鲁棒性分析,可以借鉴控制理论思想和数学解析的方法,结合数字仿真技术进行研究

3.2 鲁棒调度问题

实际生产过程中可能存在一些不确定因素,对于调度目标函数的影响并不很大,但是它们的存在往往会影响正常的生产过程,因此必须考虑存在不确定性条件下的鲁棒调度,即确定一种对不确定因素的变化具有鲁棒性的调度方案,当存在不确定因素时,按该调度方案执行,既能保证生产过程的正常进行,又能保证具有优化(满意)的目标函数。这方面的研究重点是对于一个实际的生产调度问题,如何对不确定因素进行数学描述,建立怎样的最优评价函数和调度模型,采用什么优化方法,如何应用随机规划和模糊规划理论^[44]解决不确定条件下的调度问题。同时要重视生产过程瓶颈分析^[45],使制订的生产调度既有鲁棒性,又有操作柔性

3.3 基于分散型结构模型的大型流程工业企业生产调度

由于许多集团型工业企业下属的生产和经营性单位众多,可能分布在不同的地方,这给集团企业的

生产调度方案的制订和实施带来不便,借鉴大系统理论中分散控制的思想,如何构建企业的生产调度的分散型模型及其相应的调度方案,对于解决子公司或生产工厂的地域差引起的困难具有优势。这方面的研究重点是生产调度方案实施过程中的信息反馈技术和上层协调机构对各分散子系统的协调算法。

3.4 适应性调度问题

要根据流程工业企业的特点研究适应性调度问题。在柔性制造系统中,已经开展了适应性调度的研究,取得了许多研究成果。但石油、化工企业的生产工艺与机械制造业相比要复杂得多,尤其是间歇化工生产过程,如何在这些领域开展适应性调度研究,还有许多工作要做。

3.5 设计和调度的一体化问题

间歇生产过程设计对于企业是十分重要的问题。一条生产线如果设计得好,不仅使生产得以正常进行,而且可以在同一条生产线上生产不同种类的产品,提高生产线的柔性,使企业获得更大的经济效益。有关新过程设计和旧生产过程的翻新改造方面的研究,国外从 60 年代就已开始。近年来考虑到实际生产过程和环境的不确定性,提出了设计与调度统一考虑的问题,即设计调度一体化,有关这方面的研究,国外已经开始,但国内研究较少^[3,35,46-49]。随着我国市场经济体制的不断完善,设计与调度一体化问题也将会引起人们的重视。

4 结 语

流程工业在我国的工业生产中占有极为重要的地位,企业的优化生产调度对增强企业的竞争力、提高企业的经济效益和社会效益将会产生重要的作用,同时实用的调度应用软件的市场需求量也是十分巨大的。本文对存在不确定条件下的生产调度作了综述,包括不确定性的分类、描述、调度方法等,并对有关不确定性调度的进一步的研究内容作了介绍。为了使信息资源实现共享,信息集成技术的研究对企业管理也是一个重要内容。

参考文献:

- [1] Yamamoto M, Nof S F. Scheduling /rescheduling in the manufacturing operating system environment [J]. *Int J Prod Res*, 1985, **23**(4): 705-722.
- [2] Mignon D J, Honkomp S J, Reklaitis G V. A framework for investigating schedule robustness under uncertainty [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1995, **19** (Suppl): S615-620.
- [3] Pistikopoulos E N. Uncertainty in process design and operations [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1995, **19** (Suppl): S553-563.
- [4] Honkomp S J, Reklaitis G V. Robust scheduling with processing time uncertainty [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1997, **21**(Suppl): S1 055-1 060.
- [5] Honkomp S J, Mockus L, Reklaitis G V. A framework for schedule evaluation with processing uncertainty [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1999, **23**: 595-609.
- [6] Schmidt C W, Grossmann I E. A mixed integer programming model for stochastic scheduling in new product development [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1996, **20**(Suppl): S1 239-1 244.
- [7] 李明切,顾幸生.处理时间不确定情况下 Jobshop 问题鲁棒调度研究 [J]. *浙江大学学报(自然科学版)*, 1998, **32**(2)增刊: 711-719.
- [8] 李明切.间歇生产过程鲁棒调度策略的研究 [D]. 上海:华东理工大学,1998.
- [9] Lee E S, Reklaitis G V. Intermediate storage and operation of batch process under batch failure [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1989, **13**(4/5): 491-498.
- [10] Lee E S, Reklaitis G V. Intermediate storage and the operation of periodic process under equipment failure [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1989, **13**(11/12): 1 235-1 243.
- [11] Daeho K, Moon I. Rescheduling algorithms in case of unit failure for batch process management [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1997, **21**(Suppl): S1 067-1 072.
- [12] 王 玮,汪定伟,王晓琦.基于模糊交货期的单件制造业准时化生产计划 [J]. *系统工程学报*, 1998, **13**(2): 63-69.
- [13] 王朝晖,甘文泉,陈浩勋,等.具有模糊缓冲库存约束的化工批处理过程的调度 [J]. *系统工程理论与实践*, 1998, **7**: 62-68.
- [14] Ali A, Tatari M F. Simulation of different rules in stochastic flowshops [J]. *Computers Ind Engng*, 1996, **31**(1/2): 209-212.
- [15] Chen H, Yao D D. Dynamic scheduling control of a multi-class fluid network [J]. *Operations Research*, 1995, **41**: 1 104-1 115.
- [16] Chen W, Muraki M, Jiang W S. A Reactive scheduling approach [A]. *Proc of International Conference of Japanese-Chinese Youngest Scientists* [C]. Yokohama [s. n], 1995. 127-134.
- [17] Chiotti O J, Salomone H E, Iribaaen O A. Batch plants with adaptive operating policies [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1996, **20**(10): 1 241-1 256.
- [18] Church L K, Uzsoy R. Analysis of periodic and event-driven rescheduling policies in dynamic shops [J]. *Int J Computer Integrated Manufacturing*, 1992, **5**(3): 153-163.
- [19] Cott B J, Macchietto S. Minimizing the effects of batch process variability using on-line schedule modification [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1989, **13**(1/2): 105-113.

- [20] Ishii N, Muraki M. A process-variability-based on-line scheduling and control system in multiproduct batch process [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1996, **20**(2): 217-234.
- [21] Kanakamedala K B, Reklaitis G V, Venkatasubramanian V. Reactive schedule modification in multipurpose batch chemical plants [J]. *Ind Eng Chem Res*, 1994, **33**: 77-90.
- [22] 韩亚欣, 谭跃进, 沙红兵. 面向并行工程的重调度方法 [J]. *系统工程*, 1997, **15**(6): 21-25.
- [23] Rodrigues M T M. Reactive scheduling approach for multipurpose chemical batch plants [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1996, **20**(Suppl): S1 215-S1 220.
- [24] Sanmarti E, Huercio A, Espuna A. Combined scheduling / reactive scheduling strategy to minimize the effect of process operations uncertainty in batch plants [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1996, **20**(Suppl): S1 263-S1 268.
- [25] 胡 斌, 黎志成. 考虑随机因素的单元车间生产作业计划方法研究 [J]. *系统工程*, 1999, **17**(1): 46-51.
- [26] Harmonosky C M, Robohn S F. Real-time scheduling in computer integrated manufacturing, a review of recent research [J]. *Int J Computer Integrated Manufacturing*, 1991, **4**: 331-340.
- [27] Presman E, Sethi S, Zhang Q. Optimal feedback production planning in a stochastic N-machine Flow shop [J]. *Automatica*, 1995, **31**(9): 1 325-1 332.
- [28] Yamalidou E C, Patsidou E P, Kantor J C. Modeling discrete event dynamical systems for chemical process control—a survey of several new techniques [J]. *Computers Chemical Engineering*, 1990, **14**(3): 281-299.
- [29] 李余正. 柔性过程系统的最优设计和生产调度新方法研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 1996.
- [30] 李余正, 顾幸生, 蒋慰孙. 一类柔性过程的动态 Reactive 调度方案 [J]. *浙江大学学报 (自然科学版)*, 1996, **30**(增刊): 163-167.
- [31] Schilling G, Pantelides C C. Optimal periodic scheduling of multipurpose plants [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1999, **23**: 635-655.
- [32] Nott, H P, Lee P L. Sets formulation to schedule mixed batch / continuous process plants with variable cycle time [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1999, **23**: 875-888.
- [33] Nott, H P, Lee P L. An optimal control approach for scheduling mixed batch / continuous process plants with variable cycle time [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1999, **23**: 907-917.
- [34] 吴受章, 辛为民. FMS 的模型参考自适应调度 [J]. *控制理论与应用*, 1992, **9**(6): 646-651.
- [35] Ierapetritou M G, Pistikopoulos E N. Batch plant design and operations under uncertainty [J]. *Ind Eng Chem Res*, 1996, **35**: 772-787.
- [36] Yang C O, Liou M E. A decision analysis method for a tardy WIP from the production cost point of view [J]. *Int J of Syst Sci*, 1998, **29**(4): 373-388.
- [37] 陈 伟. 间歇过程生产管理的适应调度系统 [D]. 上海: 华东理工大学, 1996.
- [38] Badell M, Nougues J M, Puigjaner L. Integrated on line production and financial scheduling with intelligent autonomous agent based information system [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1998, **22**(Suppl): S271-278.
- [39] Chaudhuri P D, Diwekar U M. Synthesis under uncertainty with simulators [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1997, **21**(7): 733-738.
- [40] Samikoglu O. Sensitivity analysis for project planning and scheduling under uncertain completions [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1998, **22**(Suppl): S871-S874.
- [41] 顾幸生, 李明切. Flow shop 调度问题的鲁棒性初探 [J]. *信息与控制*, 1999, **26**(增刊): 342-345.
- [42] 顾幸生. The robust scheduling for flowshop problem under uncertainty [C]. *Proc of the Third Asian Control Conference Shanghai* 2000, 7.
- [43] Sanmarti E, Espuna A, Puigjaner L. Effects of equipment failure uncertainty in batch production scheduling [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1995, **19**(Suppl): S565-570.
- [44] 刘宝碇, 赵瑞清. 随机规划与模糊规则 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [45] 王 军. 流程工业的过程瓶颈分析及生产调度问题的研究 [D]. 北京: 清华大学, 1998.
- [46] Chen L H, Chen Y H. A design procedure for a robust Job Shop manufacturing system under a constraint using computer simulation experiments [J]. *Computers Ind Engng*, 1996, **30**(1): 1-12.
- [47] Mariani G I, Pistikopoulos E N. Batch plant design and operations under uncertainty [J]. *Ind Eng Chem Res*, 1996, **35**: 772-787.
- [48] Reklaitis G V. Review of scheduling of process operations [J]. *AIChE Symp*, 1982, Series **78**: 119-132.
- [49] Rodammer F A, White K P. A recent survey of production scheduling [J]. *IEEE Tran on Systems, Man and Cybernetics*, 1988, **18**(6): 841-852.