

文章编号: 1001-0920(2007)05-0499-06

基于节点流的流程工业生产物流调度方法及应用

覃一宁, 刘全利, 王伟

(大连理工大学 信息与控制研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘要: 流程工业生产物流动态平衡调度是典型的多工序、多目标、多约束的多机并行调度问题, 难以解析建模. 为此, 提出了节点流控制及切换的概念, 建立了生产调度模型, 并采用多目标分层求解调度模型. 在此基础上, 提出了流程工业生产的物流平衡调度方法. 实际应用表明, 所提出方法提高了物流动态调度的准确性和生产效率.

关键词: 流程工业; 动态调度方法; 节点流控制

中图分类号: TP339 **文献标识码:** A

Production logistics scheduling method and its application for process industries based on node-flow control

QIN Yi-ning, LIU Quan-li, WANG Wei

(Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China.
Correspondent: QIN Yi-ning, E-mail: qinyining@sina.com)

Abstract: The production logistics dynamic balance scheduling is a typical multi-procedure, multi-object, multi-constraint, multi-machine parallel scheduling problem, which is difficult to build its mathematic model. A node-flow control and switch concept are proposed and a logistics scheduling model is built for solving this problem. A production logistics optimal scheduling method for process industries is suggested by using a multi-object and multi-stage optimal algorithm. An application demonstrates that the proposed method improves the accuracy and efficiency of production scheduling.

Key words: Process industries; Dynamic scheduling method; Node-flow control

1 引言

物流平衡动态调度问题是流程工业生产计划和动态调度中的重要研究方向之一. 流程工业生产伴随着大量复杂的资源约束、工艺约束和能源约束, 具有生产批量大、品种繁杂、生产周期短、运行环境复杂、生产物流连续性强等特点, 对生产调度的实时性、协调性和可靠性等要求很高, 对其建模及优化求解非常困难. 因此, 有关适合于流程工业的物流平衡动态调度方法, 至今还缺乏系统而有效的研究.

目前已发表的文献, 主要围绕生产机组的合同交货期、生产能力、负荷率等方面展开, 没有对流程生产中的仓库缓冲、多品种、多路径和变化的生产能力等关键问题进行深入分析, 生成的模型难以实际应用. 美国学者提出了过程流调度的概念, 即通过整个生产过程中各级库存的优化设置, 将全流程级的

动态调度问题分级解耦, 进而缩小问题的难度. 日本学者提出了分散自治调度的方法, 即将全厂的主调度按工艺分解为各个车间的子调度, 独立建立各个车间的子调度模型; 在此基础上, 通过各子调度解间的交互形成全流程动态调度的优化解^[1-4]. 但是这些方法主要以实验性的建模为主, 没有考虑实际应用中大量的约束条件.

文献[5]以石化行业为背景, 提出了基于综合物流和解耦策略的优化排产和调度技术, 应用中以生产效益为控制主线. [6]研究了典型钢铁产品生产工艺流程下的生产物流平衡问题, 结合机组的生产能力组织生产, 建立了面向合同交货期和交货量的多阶段生产物流平衡模型, 并采用启发式算法及粗细平衡来调整用户合同交货期. [7]提出的现代制造的物流模型方法, 是以合同交货期为核心的选择产品

收稿日期: 2006-02-16; 修回日期: 2006-04-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474058, 60604026); 辽宁省高校重点实验室基金项目(200521307).

作者简介: 覃一宁(1973—), 男, 成都人, 博士生, 从事生产计划与调度、智能算法等研究; 王伟(1955—), 男(满族), 辽宁鞍山人, 教授, 博士生导师, 从事生产计划与调度、模型预测控制等研究.

的加工模式,但对于各个与物流密切相关的生产元素对物流平衡调度的影响未作深入研究,也未考虑实际生产中库存客观限制对物流调度的影响.[8]研究了轧钢行业热-热混装和冷-热混装的生产物流问题,并以库存缓冲特征值模型为基础,建立了不同生产情况下的混装生产物流模型,但只讨论了单库存的情况,也未考虑多品种生产对物流平衡的影响.[9-11]利用多旅行商问题对轧机的轧制计划进行研究,但与冷轧的全流程生产物流调度还存在差别。

针对流程工业生产物流平衡调度的特点,本文提出了节点流控制及切换的概念,并建立了流程工业生产的物流平衡动态调度模型.该模型充分考虑了生产中合同交货期、产能预测、仓库缓冲、多品种、多路径和变化的生产能力等关键因素,并采用基于规则的多目标分层优化方法求解该模型.本文提出的物流平衡调度方法已应用于生产计划调度,取得了良好的效果。

2 问题描述

流程工业生产的物流平衡动态调度的目标,除了保证机组的生产效率、提高产量之外,还要求生产的各个工序有节奏地工作,既要求各生产设备有最优负荷,又使其不超过最大生产能力.生产过程中的中间缓冲库尽量避免出现涨库和空库的情况,尽可能减少生产设备的启停次数,能适应生产环境的变化,并考虑多品种多路径生产对物流平衡的影响。

本文考虑的冷轧薄板加工是典型的流程工业生产过程,其工艺流程如图1所示.其中包括酸洗、主轧、退火、平整、剪切、重卷、镀锌、镀锡等多道机组工序。

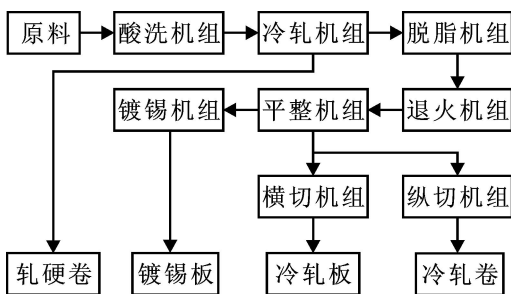


图1 冷轧薄板生产流程

各生产机组之间通过中间钢卷库存储流程中的半成品.由于加工情况的特点,生产中的中间库存较小.生产过程前后制约,工艺规范要求严格,对机组的启停次数也有严格要求.因此,物流平衡动态调度的关键是:通过合理的生产物流调度来组织生产,提高制成品产量,降低机组启停次数,并保证产品交货期。

结合图1的实际生产情况,总结其生产特点如

下:

1) 在实际生产中,由于生产产品的种类各异,其生产路线也不同.生产物流发生前,首先确定加工产品的种类,然后为不同种类的产品设计出加工路径。

2) 在加工过程中,生产机组的输入为上一级仓库的输出,生产机组的输出流向可以到下一级仓库或直接为成品.这种流向的不同对下一级仓库的库存变化将造成很大的影响。

3) 由于生产机组生产能力的不平衡,将直接表现为库存的变化.当库存达到高限时,该库的上一级生产机组必须停止生产,即涨库停机.当库存下降到零时,下一级的生产机组必须停止生产,即待料停机.在流程工业的实际生产中,除了有计划地停机外,机组的无计划启停会造成整个生产线效率降低、较大的能源浪费和机组寿命损耗。

4) 对于不同的加工产品,机组的加工速度会有很大的不同.物流调度的重要工作之一,就是通过转换不同产品组批的加工来平衡整体物流。

3 基于节点流控制的流程工业生产物流调度方法

通过对流程工业生产过程的分析研究,本文提出基于节点流控制及切换的流程工业物流动态调度方法.节点流控制是指模型以生产中的各个中间缓冲库作为节点,控制各中间库的物流产品流量.节点流切换是指模型以关键生产机组的生产状态的启停变化,以及产品种类的选择切换作为控制和调节节点流的手段.模型在运行中充分利用各级库存缓冲、生产机组的状态启停变化和品种选择,达到节点流控制和切换的目的,以提高生产效率并最大限度地减少关键生产机组的非计划启停次数,实现物流的平衡调整和调度。

3.1 目标函数

物流平衡和调度的目标是在给定产品交货期和满足各种约束条件的情况下,使全部产品加工时间最短,同时为调度决策者提供具体生产调度的依据:

1) 选择多种待加工产品的生产顺序;2) 确定各类产品的开始加工时间;3) 确定每个生产机组的生产状态以及启停的具体安排等。

结合上述调度需求和优化目标,可构造出流程工业生产物流平衡调度问题的目标函数如下:

(1) 产品加工总时间最短,即

$$\min f = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m Q_j / P_{ij} \quad (1)$$

式中: m 为生产机组的数目, n 为待加工产品种类, Q_j 为第 j 种待加工产品的合同总量对应的产能模型

转换系数的总量, P_{ij} 为第 i 台机组对应第 j 种待加工产品的加工能力(单位为产能模型转换系数 / min), 目标函数 f 为加工完所有产品所用的总时间(单位为 min).

式(1)所示的优化目标就是通过合理调度, 最大限度地减少产品加工所需的总时间, 从而提高机组的生产效率和产能.

(2) 关键机组的非计划启停次数最少, 即

$$\min g = \sum_{i=1}^l \sum_{t=0}^T B_i^t, \quad (2)$$

其中

$$B_i^t = \begin{cases} 0, & C_i^t = C_i^{t-1}; \\ 1, & C_i^t \neq C_i^{t-1}. \end{cases}$$

B_i^t 为关键机组的生产状态变化情况; $l \sim m$ 为关键机组的数目, 可根据实际情况设定; t 为模型与现实时间直接对应的仿真时钟时间, 根据实际精度要求, t 的间隔可设为 min, h 或 d; T 为设定的生产调度周期, t 从 0 到 T 表示一个生产调度周期的时间序列, 根据实际调度要求, T 可以是一周、一句、一个月或一个设定的生产调度周期; C_i^t 为每个关键机组的生产状态(生产时为 1, 停机时为 0), 如果某个关键机组发生变化, 则 $B_i^t = 1$, 否则 $B_i^t = 0$; 目标函数 g 为一个生产调度周期内的关键机组的启停次数总和.

式(2)所示的优化目标就是减少关键生产机组的启停变化次数, 从而提高关键机组的生产效率, 降低非计划停机的时间损失, 以及由于启停造成的包括加工产品和辅助原料等的额外损耗, 节省能源并延长关键机组的寿命.

3.2 约束条件

由于流程工业生产的固有特点, 加工过程中必然存在一些约束条件, 调度时必须满足这些条件.

(1) 库存约束

$$S_i^{\min} \leq S_i^t \leq S_i^{\max}. \quad (3)$$

式中: S_i^t 为各中间缓冲库容量; 下标 i 为 $2 \sim m - 1$, 表示 2 号 ~ $m - 1$ 号机组的中间前库; S_i^{\min} 为第 i 个中间库设定的最小安全库存量; S_i^{\max} 为第 i 个中间库设定的最大安全库存量.

式(3)表示在进行生产物流调度时, 中间库存应尽可能保证在安全库存范围内.

(2) 交货期约束

$$d_i^{\min} \leq d_i^{\text{ast}} \leq d_i^{\max}. \quad (4)$$

式中: d_i^{\min} 为第 i 种产品的最早交货期, d_i^{\max} 为第 i 种产品的最晚交货期, d_i^{ast} 为第 i 种产品的最后一批加工完成的日期, $i = 1, 2, \dots, n$.

式(4)表示在进行生产物流调度时, 产品交货期应在限制范围内.

目标函数(1)和(2)的求解采用多目标分层优化的方法. 即首先通过目标函数(1)求得物流加工总时间最短的一个优化解集, 该解集由与最优解相差 % 以内的所有解组成. 在实际应用中, % 可根据产品结构情况进行调整, 一般取 10 % 左右. 然后通过目标函数(2)在该解集中寻找关键机组启停次数最少的优化解集. 关键机组的数目可根据实际情况定义为一个或多个.

之所以采用多目标分层优化的方法, 主要是考虑到从目标函数(1)得出的物流加工时间最短的最优解, 只是形式上的最优解. 在冷轧薄板实际生产中, 由于受生产机组状况、生产能力的不平衡、工艺规范的特殊要求、中间库存的限制等多种原因, 难以按最优解来安排实际生产. 一个可行的办法是通过专家规则筛选后, 先从目标函数(1)中计算出一个优化解集, 再在这个优化解集中通过目标函数(2)对关键机组的启停次数寻优. 这样可减少关键生产机组的启停变化次数, 提高关键机组的生产效率和产能, 节省能源并延长关键机组的生产寿命.

在目标函数(2)的寻优过程中, 给出的是一个参考的优化解集. 调度决策者可根据自己的特殊要求, 在这个优化解集中挑选认为满意的调度结果.

3.3 目标函数的求解

从实用的角度出发, 对目标函数采用基于规则的启发式算法求解, 以库存节点流的变化来控制生产产品种类的选择, 并调整生产路线的变化, 从而达到调度平衡的目的. 实际运算时根据可调度工序的概念进行递推, 搜寻可调度工序, 并用启发式规则进行优化. 即根据给定的条件, 获得可行的求解优化解集的算法.

(1) 库存变化

库存变化的表达式为

$$S_{i+1}^{t+1} = C_i d_i^t E_i^t - C_{i+1} d_{i+1}^t E_{i+1}^t + S_{i+1}^t. \quad (5)$$

其中: S_{i+1}^t 为各级中间缓冲库容量, 上标 t 为仿真时钟 t 时刻的库存, 下标 i 为 1 号 ~ m 号机组; C_i 为各级机组的工作状态(1 或 0); E_i^t 为第 i 台机组从 $t - 1$ 到 t 时刻的产量; d_i 为产品在各台机组的流向, $d_i = 1$ 表示产品在本机组加工后送到下一级仓库中等待下一级机组加工, $d_i = 0$ 表示产品在本机组直接加工为成品, 不送到下一级仓库.

式(5)表示每个中间缓冲库在时间序列中的库存变化, 即当前库存量等于原库存量加上当前库上一个机组的单位时间生产量, 再减去下一个机组的单位时间生产量. 中间库存的变化表示整个模型的节点变化.

(2) 机组产能变化

机组产能变化的表达式为

$$P_{ij} = F_{ij}(Z_{ij}). \quad (6)$$

其中

$$Z_{ij} = \frac{M_{ij}}{G_{ij}L_j H_j j},$$

$$i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n.$$

Z_{ij} 为各第 j 种待加工钢卷在第 i 台机组上的产能模型转换系数; $F_{ij}(Z_{ij})$ 表示机组的产能是产品分类的非线性函数, 每个不同机组的产能随着加工的不同而产品各异; M_{ij} 为第 i 台机组的设计生产能力对应第 j 种产品的修正系数; M_{ij} 为第 i 台机组对第 j 种产品的待加工钢卷的重量, 单位为 t ; G_{ij} 为第 i 台机组加工第 j 种设计加工钢卷的重量, 单位为 t ; L_j 为第 j 种加工钢卷的宽度, 单位为 mm ; H_j 为第 j 种加工钢卷的厚度, 单位为 mm ; j 为第 j 种加工钢卷的密度, 单位为 t/m^3 .

函数 $F_{ij}(Z_{ij})$ 是通过采集的大量实际生产数据, 应用数据挖掘和数学模型回归等技术产生的. 通过分析所建各机组的产能模型函数, 可以准确地表征各机组的生产加工能力.

以某大型冷轧薄板厂为例, 共采集 50 000 点以上冷轧机组的实时数据, 利用产能模型进行挖掘和回归, 通过式 (6) 的转换, 最终将机组的设计生产能力、钢卷的重量、宽度、厚度、钢种等表示为钢卷的线长度. 处理后回归的 Pearson 相关系数高达 0.968 6, 从而有效地归纳出该冷轧机组加工轧硬卷产品的动态产能函数. 以此类推, 可得到所有机组加工各类产品的生产能力函数.

(3) 产品加工选择和工艺路线

产品加工生产选择和工艺路线表达式为

$$d^i = [d_1^i \quad d_2^i \quad \dots \quad d_m^i] = p^i R. \quad (7)$$

其中产品加工的选择 p^i 和生产路线矩阵 R 分别为

$$p^i = [p_1^i \quad p_2^i \quad \dots \quad p_n^i],$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}.$$

并且

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{第 } j \text{ 种产品生产不通过第 } i \text{ 台机组;} \\ 1, & \text{第 } j \text{ 种产品生产通过第 } i \text{ 台机组.} \end{cases}$$

R 矩阵定义了每种加工产品必须经过的加工路线; p^i 定义了选择加工的产品, 为 1 表示该种产品被选择, 为 0 表示未被选择; 根据 p^i 和 R 算出的 d^i 表示所选择产品对应每台机组的加工产品流向, $d_i^i = 1$ 表示产品在本机组加工后送到下一级仓库中等待下一级机组加工, $d_i^i = 0$ 表示产品在本机组直接加

工为成品.

式 (7) 表征了模型中对不同产品种类的选择将造成加工路线的变化, 从而表明了由于加工产品选择的不同, 也会影响库存节点和生产机组产能节点流的变化.

(4) 求解规则

规则 1: 以产品出现明显分类而造成不同流向的生产机组为物流平衡的基准点, 通过对库存变化的预测, 选择加工不同种类的产品;

规则 2: 只有在物流平衡确实无法满足的情况下, 才进行停机操作, 并保证单次停机时间尽可能长;

规则 3: 以最迟开工时间为序安排生产;

规则 4: 如果几类生产的开工时间相同, 则作业优先级为选择生产变化最小、持续期最长、原材料需求最大的生产作业;

规则 5: 若出现紧急状况打断正常生产秩序, 则整个生产顺序迟延;

规则 6: 同等情况下, 小批量产品优先;

规则 7: 在调整短计划期的生产物流平衡状态时, 长计划期的平衡保持不变.

3.4 基于节点流控制的计算过程

综上所述, 调度计算过程如下:

Step 1: 对需要加工的产品列表, 进行明确的分类并转换, 得到式 (6) 所需的 Z_{ij} .

Step 2: 根据式 (6) 确定各个机组的加工能力 P_{ij} .

Step 3: 根据 Q_j 和 P_{ij} 确定各类产品在各个机组的加工时间.

Step 4: 按照求解规则进行初次生产排序, 得到符合调度规则的初始解集.

Step 5: 确定仿真时间序列参数 $t = 0$, 得到式 (5) 中各节点的初始库存 S_{i+1}^t .

Step 6: 根据式 (3) 对各库存 S_{i+1}^t 的情况选择不同种类的产品, 从而确定产品加工的工艺路线. 以产品出现明显分类而造成不同流向的生产机组为物流平衡的基准点.

Step 7: 设定 $t = t + 1$, 重复 Step 6. 即通过对库存变化的仿真时间预测, 根据模型优化目标和约束函数, 选择加工不同种类的产品, 最终求得各产品种类的选择和各机组的变化状态的仿真时间序列. 当 $t = T$ 时, 转到 Step 8.

Step 8: 对于 Step 7 产生的多种可能的选择结果集合进行仿真计算, 根据目标函数 (1) 得到该路线下物流加工的总时间, 在满足式 (4) 产品交货期的前提下, 选择其中与加工时间最少的解相差 % 范

围内的一组解集. 实际运用中, 可根据生产要求调整解集的范围.

Step9: 对于 Step8 中产生的解集合, 通过目标函数 (2) 选择其中关键机组状态变化最少的解集合.

4 物流调度方法的实际应用

根据本文提出的物流动态平衡调度模型, 利用 NET 构架下 C# 语言开发了物流调度软件系统, 并应用于某冷轧厂的生产计划和物流调度. 该厂的生产计划和物流调度一直由人工编制. 由于合同种类多、批量小、生产中间库存小, 在生产和调度中花费了大量时间, 并且只能根据经验进行 3 天以内的生产物流调度, 要准确地统筹安排全月调度难度很大.

以该厂 2004 年 7 月的生产合同为例, 合同数目为 436 个, 产品种类为 8 种, 合同总量为 50 668 t. 根据本文开发的软件系统, 生产前只需 3 min 即可完成全部合同的生产计划, 并能根据生产情况的变化随时进行动态调度, 产生新的滚动生产计划, 提高排产工效数十倍. 按照人工排产, 整个合同的产出需要有效生产加工时间约为 41 760 min, 而采用本文方法调度后的生产时间为 40 078 min, 提高了生产有效作业率和排产准时性, 创造了明显的经济效益.

(1) 各分类产品的分组加工时间序列

按照上述物流平衡调度算法, 得到各类产品的加工时间如表 1 所示. 由于加工时间控制准确, 物流调度得当, 有效地提高了机组的综合生产效率.

表 1 机组工作状况和生产物流安排

组批	生产时间/h	开始日期	开始时间	结束日期	结束时间	生产机组
ZE01	4.4	6-25	23:07	6-26	3:36	酸洗
ZE01	17.5	6-26	16:59	6-27	10:34	冷轧
ZE02	24.6	6-27	4:16	6-28	4:54	酸洗
ZE02	22.4	6-28	2:32	6-29	1:01	冷轧
ZE03	19.8	6-30	4:55	7-1	0:44	冷轧
ZE04	24.4	6-29	19:18	6-30	19:44	酸洗
ZE04	21.2	7-1	1:01	7-1	22:14	冷轧
ZE05	22.3	7-2	15:17	7-3	13:35	冷轧
ZE06	25.3	7-3	20:28	7-4	21:48	酸洗
ZE06	22.7	7-5	8:51	7-6	7:35	冷轧
ZE07	25.0	7-6	9:24	7-7	10:25	酸洗
ZE12	23.9	7-14	23:19	7-15	23:15	酸洗
ZE12	20.6	7-16	0:47	7-16	21:25	冷轧

(2) 关键机组的启停次数

在保证计划停机的基础上, 物流调度得出关键机组最优的启停次数安排. 从表 2 可以看出, 作为流程生产中的关键冷轧 02 机组和酸洗 01 机组, 由于

物流调度合理, 全月未发生一次因调度不合理而出现的非计划停机事件. 以往在人工调度时, 经常出现因物流调度问题使轧机发生待料停机或涨库停机等问题, 造成生产效率的下降和较大的附加经济损失.

表 2 各台机组的启停状态安排

机组	开始时间	结束时间	停机类型	停机时间
01	7-1, 19:54	7-2, 19:54	设备定修	24
02	7-4, 8:51	7-5, 8:51	设备定修	24
03	7-1, 21:41	7-3, 5:41	待料停机	32
03	7-6, 5:28	7-7, 5:28	设备定修	24
03	7-6, 13:28	7-7, 5:28	待料停机	16
05	7-5, 22:21	7-6, 22:21	设备定修	24
07	7-6, 8:03	7-7, 16:03	待料停机	32
07	7-10, 14:03	7-11, 14:03	设备定修	24

(3) 各中间库存的变化

通过优化的物流生产安排, 不仅保证了机组生产的优化, 而且保证了各中间库存一直控制在合理水平. 以关键的冷轧 02 机组为例, 按照优化的调度计划安排生产, 其库存变化 (见图 2) 一直保持在组织生产的正常水平. 通过优化合理的物流动态调度, 各中间库存比原先库存平均降低了 5%, 从而保证了物流畅通, 提高了生产效率.

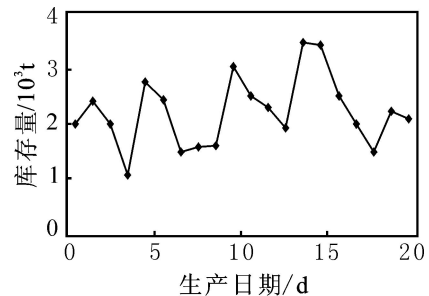


图 2 冷轧 02 机组前库的库存变化

5 结 语

本文针对流程工业生产物流动态调度问题, 提出了基于节点流控制和产品切换的概念. 通过加工产品种类的选择、机组生产状态的切换以及库存变化的控制等因素, 建立了流程工业生产物流动态平衡调度模型, 并用基于规则的启发式算法进行优化求解, 最终建立了流程工业的物流平衡动态调度方法. 该方法有效解决了流程工业实际生产中的物流控制和平衡问题, 并在实际应用中取得良好的效果.

参考文献 (References)

[1] Li H, Li Z C, Li L X, et al. A production rescheduling expert simulation system[J]. European J of Operational Research, 2000, 124(2): 283-293.

[2] Nishi T, Sakata A, Hasebe S, et al. Autonomous decentralized scheduling system for just-in-time

- production[J]. Computers and Chemical Engineering, 2000, 24(2): 345-351.
- [3] Zatel G, Missbauer H. New concepts for production planning and control [J]. European J of Operational Research, 1993, 67(3): 297-320.
- [4] Rodammer F, White K P. A recent survey of production scheduling [J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 1988, 18(6): 841-851.
- [5] 罗焕佐, 宋国宁, 王晓峰, 等. 流程企业智能排产与优化调度技术[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 11(9): 980-983.
(Luo H Z, Song G N, Wang X F, et al. Technology of intelligent planning and optimal scheduling for process enterprises [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2003, 11(9): 980-983.)
- [6] 李苏剑, 常志明. 面向合同生产的钢铁企业多阶段生产物流模型[J]. 北京科学技术大学学报, 1999, 21(6): 353-359.
(Li S J, Chang Z M. Facing contracts models for multiple stages production logistics balance in iron and steel complex[J]. J of Beijing University of Science and Technology, 1999, 21(6): 353 - 359.)
- [7] 杨剑, 贾仁安. 现代制造业生产物流模型研究[J]. 物流技术, 2004, 9(9): 61-62.
(Yang J, Jia R A. Research on production logistics model of modern manufacturing industry [J]. Production Logistics, 2004, 9(9): 61-62.)
- [8] 李苏剑, 吴清一. 混装生产物流数学模型研究[J]. 北京科学技术大学学报, 1994, 16(5): 440-445.
(Li S J, Wu Q Y. Study on mathematical models of production logistics in mixing charge [J]. J of Beijing University of Science and Technology, 1994, 16(5): 440-445.)
- [9] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Boshan iron and steel complex [J]. European J of Operational Research, 2000, 124(2): 367-382.
- [10] Goldberg D E, Lingle J R. Loci and the traveling salesman problem [C]. Proc of Int Conf on Genetic Algorithm and Their Applications. Pittsburgh, 1985: 154-159.
- [11] Mohson Elhafsi. A production planning model for an unreliable production facility: Case of finite horizon and single demand [J]. European J of Operational Research, 2002, 143(1): 94-114.

(上接第 498 页)

- [7] Trigeorgis L. The nature of option interactions and the valuation of investments with multiple real options[J]. J of Financial and Quantitative Analysis, 1993, 28(1): 1-20.
- [8] Childs P D, Triantis A J. Dynamic R&D investment policies[J]. Management Science, 1999, 45(10): 1359-1377.
- [9] 李洪江, 曲晓飞, 冯敬海. 阶段性投资最优比例问题的实物期权方法[J]. 管理科学学报, 2003, 6(1): 20-26.
(Li H J, Qu X F, Feng J H. Definition of optimal proportion of phased investment: Real options approach [J]. J of Management Sciences in China, 2003, 6(1): 20-26.)
- [10] Benaroch M. Option-based management of technology investment risk [J]. IEEE Trans on Engineering Management, 2001, 48(4): 428-444.
- [11] Copeland T, Antikarov V. Real options [M]. New York: Texere, 2001.
- [12] Trigeorgis L. Making use of real options simple: An overview and applications in flexible/modular decision making[J]. The Engineering Economist, 2005, 50(1): 25-53.
- [13] Loch C H, Bode G K. Evaluating growth options as sources of value for pharmaceutical research projects [J]. R&D Management, 2001, 31(2): 231-248.
- [14] Hart S, Hultink E J, Tzokas N, et al. Industrial Companies' evaluation criteria in new product development gates [J]. J of Product Innovation Management, 2003, 20(1): 22-36.
- [15] 李川, 邓光军, 曾勇. 技术创新与增长期权定价[J]. 运筹与管理, 2003, 12(6): 71-78.
(Li C, Deng G J, Zeng Y. Technology innovation and valuation of growth option [J]. Operations Research and Management Science, 2003, 12(6): 71-78.)
- [16] Dixit A K, Pindyck R S. Investment under uncertainty [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1994.