

文章编号: 1006-5911(2008)08-1622-08

分散决策供应链生产计划协同研究

张翠华^{1,2}, 范岩¹, 于海斌², 王养彬¹

(1. 东北大学工商管理学院, 辽宁 沈阳 110004;
2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110003)

摘要:为解决多级、多产品、分散供应链系统生产计划协同问题,提出了一种基于拉格朗日松弛算法的生产计划协同模型。在该模型中,建立每个企业独立的生产计划模型,使用拉格朗日松弛算法,松弛掉企业之间的物流平衡约束,将需要集中决策的供应链生产计划协同问题,分解为企业间分散的独立决策问题;运用次梯度算法对拉格朗日因子进行更新,通过反复迭代的优化过程实现生产计划协同。仿真实验表明,基于拉格朗日松弛算法的供应链协同对复杂供应链系统能够较好地逼近最优解,协同效果和收敛速度优于遗传算法。

关键词: 供应链; 协同规划; 分散决策; 生产计划; 拉格朗日松弛算法

中图分类号: C32 **文献标识码:** A

Collaborative production planning in distributed decision-making supply chain

ZHANG Cui-hua^{1,2}, FAN Yan¹, YU Hai-bin², WANG Yang-bin¹

(1. School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. Shenyang Institute of Automation, the Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110003, China)

Abstract: A Lagrange relaxation algorithm based model was developed to solve the problem of collaborative production planning in distributed supply chain with multi stage, multi product characteristics. In this model, the independent production planning model was constructed for each enterprise. Lagrange relaxation algorithm was used to relax the material flow balance constraints among different enterprises. Thus the integrated decision making collaboration problem was divided into some independent decision making issues scattered among enterprises. Subgradient algorithm was used to update the Lagrange multiplier. Through iteration optimization, the collaborative production planning was realized and the nearest optimal solution was achieved. In addition, some simulation experiments were designed to reveal the effects of collaboration model for complicated supply chain. Results showed that the collaboration approach could reach the best solution. And the convergence speed and collaboration effect were better than Genetic Algorithm (GA).

Key words: supply chain; collaborative planning; distributed decision making; production planning; Lagrange relaxation algorithm

0 引言

近年来,全球化市场的形成和信息技术的快速发展,给企业的供应链管理带来了前所未有的机遇与挑战^[1]。供应链管理迫切需要解决的问题是,在各种各样独立的决策单元(Decision Making Unit, DMU)控

制下的多个企业物流流程之间的协同问题。这些DMU模块分布在多个企业信息系统中,控制着企业间实时的数据交换和智能处理,从而动态地调整和控制企业的生产和运作。目前,供应链协同管理最热门的研究是如何实现协同过程,即如何设计和部署DMU模块,以达到最好的协同效果^[2]。

收稿日期: 2005-12-09; 修订日期: 2008-01-24。Received 09 Dec. 2005; accepted 24 Jan. 2008.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70401011, 70721001); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0292)。Foundation item: Project supported by the National Natural Science Foundation, China (No. 70401011, 70721001), and the Program for New Century Excellent Talents in University, China (No. NCET-06-0292).

作者简介: 张翠华(1971—),女,辽宁沈阳人,东北大学工商管理学院副教授,博士,中国科学院沈阳自动化所博士后,主要从事供应链管理、质量控制等的研究。E-mail: shyzhch@sohu.com。

考虑到 DMU 模块的数量和关系的不同,目前的协同方法可以分为集中决策和分散决策两种^[3]。在实际中主要应用的是集中决策的协同方法,但随着供应链协同管理的不断发展,其局限性也越来越明显,它在一定程度上破坏了企业经营的自主权,使复杂的供应链结构求解困难,并直接导致信息系统复杂化,难以更新和维护^[4]。

为解决集中决策的不足,分散决策的协同方法得到重视,其中研究比较成熟的有^[5]: 1 基于斯坦博格(Stackelberg)模型,解决主从递归决策问题的层次协同机制^[6]; 2 基于博弈论中委托-代理模型、和约设计理论和均衡理论提出的策略^[7]; 3 基于人工智能系统的多代理(multi Agent)理论提出的协同方法^[8]。这些协同方法的提出,在供应链管理中综合使用了博弈论、数学规划、启发式算法,以及信息技术等领域的研究,代表了供应链协同管理的新阶段。但是,这些分散决策的协同方法存在模型求解比较复杂的问题,通常需要依靠启发式算法的帮助;虽然协同过程是多方参与的,但企业间的关系并不平等,是分主次的,这与实际情况有一定的差距^[9]。

文献[10]提出了一种新型的分散决策的供应链协同方法,即在供应链协同问题中使用拉格朗日松弛法,基于模型的松弛解设计了一种反复协商的协同机制。该方法松弛掉各个供应链相邻节点之间的耦合关系约束式(物料平衡),将整个供应链系统的最优化问题分解为每个企业的分散决策问题。在整个协同过程中,每个企业只需要根据本地的信息求解自身模型的最优解,在拉格朗日松弛因子的控制下,通过反复迭代的过程向整个供应链系统的最优解逼近。使用这种协同方法的意义在于: 1 企业间的决策是分散的,企业具备完全的决策权,避免了企业提供虚假信息的情况; 2 企业信息系统之间的数据传递量很小,

大部分本地信息不需要共享,提高了安全性,降低了处理负担; 3 企业间打破了原有的主从关系,在协商过程中的地位和作用完全平等。文献[11]扩展了这项研究,在含有生产商和供应商的二级供应链环境下,使用该方法实现了生产计划协同,并通过仿真计算证明了该方法与中心决策相比具有较好的效果。

本文在以上研究的基础上,把文献[11]中简单供应链环境下的生产计划协同问题,扩展到多级、多企业、多产品的复杂供应链系统中,基于拉格朗日松弛算法,为每个企业建立独立的生产计划模型,并利用本地信息独立求解。需要协调时,供应链网络中相邻两级的企业分别利用次梯度算法对相应的折扣价格(即拉格朗日因子)进行更新,最后通过一个反复迭代的优化过程,实现供应链系统生产计划成本的最优。仿真实验表明,这种供应链协同的实现方法对复杂的供应链系统能够较好地逼近最优解,协同效果和收敛速度优于遗传算法。

1 供应链生产计划协同问题的模型与求解

1.1 供应链系统中企业间的关系

全球企业之间复杂的贸易关系构成了一个庞大的供应链网络,而这个供应网络又由许多条供应链有机组成,其中每个企业可以看作是这个庞大网络的最小单元。由于全球加工生产可能是分散的,在多种多样的场所中进行,分布式协同决策对于全球生产战略的成功实施具有至关重要的作用。全球生产供应链是由供应商、工厂、外包商、仓库、分销中心和零售商组成的网络,通过这个网络,完成生产资料采购、运输、产品经加工、生产并运送到顾客手中。供应链中任何实体的绩效依赖于其他实体,供应链的整体效率取决于实体间协商的意愿、能力和方式。全球生产供应链的基本网络结构如图 1 所示。

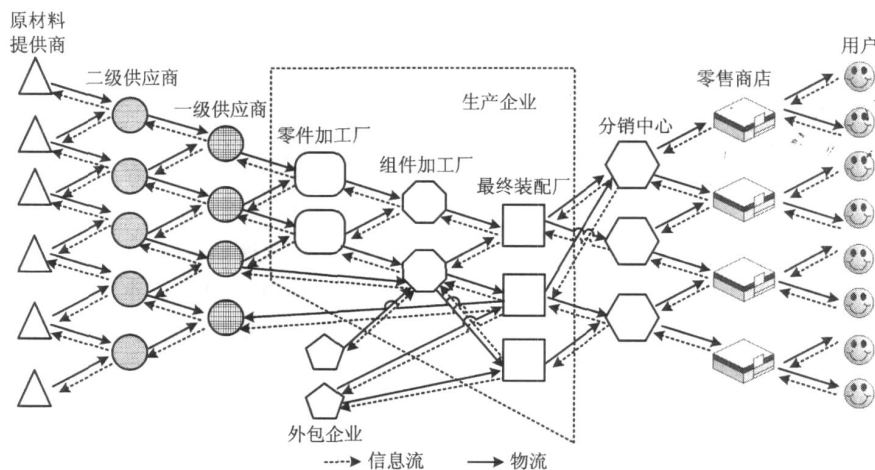


图1 全球化供应链网络结构

与主要以采购、生产和交货为目标的简单供应链相比,全球生产供应链更加复杂,面临动态协调的商务环境的挑战。本文研究了这样一个相对复杂的供应链环境,企业间的生产关系如图 2 所示。

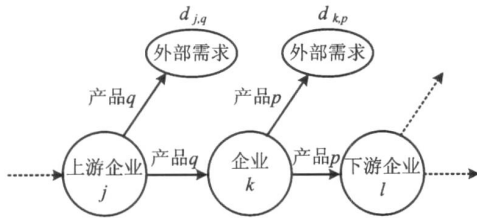


图2 供应链企业间的关系

每个企业都承担着生产商、供应商和销售商的多重角色,如图中企业 k 购买上游企业 j 的产品 q , 并以 q 为原料或者初级产品进行生产。不失一般性,这里假设生产商生产每一单位产品 p 需要一个单位的零部件 q ; 生产的产品既可以销售给市场,也可以作为原料提供给下游企业 l ; 每个企业都具自主权,可以根据自己的私有信息进行生产计划决策,供应链成员之间地位平等,必须共享的信息(如内部价格)由信息系统中的 DMU 进行调度; 整个生产过程划分为 t 个生产时段,在每个生产时段,企业 k 的外部需求 $d_{k,p}$ 是随机的,它根据产品 p 的销售价格而动态调整。

1.2 单个企业的生产计划模型

在这个供应链系统中,每个企业的生产计划问题都是经典的多级、多企业、多产品、生产能力有限的批量生产问题(Multi Level multi item Capacitated Lot-Sizing Problem, MLCLSP)。该问题的具体结构可以描述如下:

(1) 变量

t 为生产时段, $t \in T$;

p 为某企业生产的某种产品, $p \in P_k$;

q 为某企业生产所需的某种产品, $q \in Q_k$;

m 为某企业生产某种产品所需的设备资源, $m \in M_{k,q}$ 。

(2) 集合

T 为时间段 t 的集合;

P_k 为企业 k 生产的产品集合;

Q_k 为企业 k 采购的原材料产品的集合;

$L_{k,p}$ 为企业 k 的产品 p 为原材料的所有下游企业的集合;

$J_{k,q}$ 为供应链中为企业 k 提供原材料 q 的所有

上游企业的集合;

M_k 为企业 k 生产所需要的设备资源的集合。

(3) 决策变量

$X_{k,p}^t$ 为企业 k 在生产时段 t 时产品 p 的生产量;

$I_{k,q}^t$ 为企业 k 在周期 t 结束时决定产品 p 的库存量;

$Y_{k,p}^t$ 为企业 k 决定在生产时段 t 是否生产产品 p , $Y_{k,p}^t \in \{0, 1\}$, 如果 $Y_{k,p}^t = 1$, 则需要投入生产一批产品 p 的固定成本 $cf_{k,p}$; 如果 $Y_{k,p}^t = 0$ 时, 则不生产产品 p , $X_{k,p}^t$ 的值为 0;

$E_{k,m}^t$ 为在周期 t , 企业 k 决定增加设备资源 m 的数量;

$OX_{j,k,q}^t$ 为周期 t 时, 企业 k 决定向上游企业 j 定购产品 q 的数量;

$SX_{k,l,p}^t$ 为周期 t 时, 企业 k 决定向下游企业提供产品 p 的数量。

(4) 常量

$h_{k,p}$ 为企业 k 对产品 p 的单位库存持有成本;

$cf_{k,q}$ 为企业 k 用于布置生产产品 p 所需设备的固定成本, 它跟企业所拥有的设备数量有关;

$Cap_{k,m}^t$ 为企业 k 在生产时段 t 的生产能力, 即企业布置生产设备后拥有的资源 m 的数量;

$cv_{k,p}$ 为企业 k 生产产品 p 的单位可变成本, 包括原材料价格和劳务支出;

$cm_{k,m}$ 为企业 k 增加资源 m 的数量所需要的单位成本;

$d_{k,p}^t$ 为生产时段 t 外部市场对企业 k 的产品 p 的需求;

$B_{k,p}$ 为企业 k 每次准备生产设备生产产品 p 的生产批量, 它是一个较大的数;

$ap_{k,m}$ 为生产产品 p 所需要的资源 m 的数量, 可查表得到;

$bom_{q,p}$ 为产品 p 和 q 之间的物料清单(Bill of Material, BOM)关系, 可查表得到。

(5) 目标函数和约束

单个企业模型的目标函数是一个成本函数, 包含库存成本、生产准备成本、生产成本和扩大生产能力的成本。本文研究的是不同企业之间生产计划的协同问题, 为更充分说明该问题并简化计算, 在数学模型中忽略了一些与生产活动不相关的成本项, 如产品运输成本, 并假定订货提前期为 0。单个企业的生产计划模型用模型 1 表示。

模型 1

$$\min C_k = \sum_{l \in T} \sum_{p \in P_k} (h_{k,p} I_{k,p}^l + f_{k,p} Y_{k,p}^l + cv_{k,p} X_{k,p}^l) + \sum_{l \in T} \sum_{m \in M_k} cm_{k,m} E_{k,m}^l \quad (1)$$

$$\text{s. t. } I_{k,p}^{l-1} + X_{k,p}^l - I_{k,p}^l = \sum_{l \in L_{k,p}} SX_{k,l,p}^l + d_{k,p}^l, \quad p \in P_k, t = 1, 2, \dots, T; \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J_{k,q}} OX_{j,k,q}^l = \sum_{p \in P_k; bom_{q,p} \neq 0} bom_{q,p} X_{k,p}^l, \quad q \in Q_k, t = 1, 2, \dots, T; \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P_k} a_{p,m} \leq Cap_{k,m} + E_{k,m}^l, t = 1, 2, \dots, T; \quad (4)$$

$$X_{k,p}^l \leq B_{k,p} Y_{k,p}^l, k \in P_{r_n}, t = 1, 2, \dots, T; \quad (5)$$

$$X_{k,p}^l, I_{k,p}^l, SX_{k,l,p}^l, OX_{j,k,q}^l \geq 0; \quad (6)$$

$$Y_{n,k,t} \in \{0, 1\};$$

$$l \in O_k, k \in P_{r_n}, t = 1, 2, \dots, T. \quad (7)$$

其中: 式 (1) 为单个企业生产计划问题的目标函数; 式(2)表示库存平衡约束; 式(3)表示企业 n 对所有上游企业的原料需求和产品之间的产品 BOM 关系; 式(4)表示企业 n 的生产能力约束; 式(5)表示一旦生产产品 p , 发生的固定资本将受到生产批量的限制, 且数量很大。

$$I_{k,p}^{l-1} + X_{k,p}^l - I_{k,p}^l = d_{k,p}^l, \quad p \in P_k, t = 1, 2, \dots, T. \quad (8)$$

对于最下游的企业 N , 由于只面对最终用户, 不生产中间产品, 用式(8)代替式(2)。

1.3 整个供应链系统模型描述

整个供应链系统的目标函数是每个企业生产成本的总和, 最优化目标是整个供应链系统的总成本最低, 用模型 2 表示。

模型 2

$$\min TC = \sum_{k=1}^N C_k. \quad (9)$$

$$\text{s. t. } SX_{k,l,p}^l = OX_{l,k,q}^l, \quad (10)$$

$$\forall p \in P_k, k = 1, 2, \dots, N, l \in L_{k,p}, t = 1, 2, \dots, T,$$

$$I_{k,p}^{l-1} + X_{k,p}^l - I_{k,p}^l = \sum_{l \in L_{k,p}} SX_{k,l,p}^l + d_{k,p}^l,$$

$$p \in P_k, t = 1, 2, \dots, T;$$

$$\sum_{j \in J_{k,q}} OX_{j,k,q}^l = \sum_{p \in P_k; bom_{q,p} \neq 0} bom_{q,p} X_{k,p}^l,$$

$$q \in Q_k, t = 1, 2, \dots, T;$$

$$\sum_{p \in P_k} a_{p,m} \leq Cap_{k,m} + E_{k,m}^l, t = 1, 2, \dots, T;$$

$$X_{k,p}^l \leq B_{k,p} Y_{k,p}^l, k \in P_{r_n}, t = 1, 2, \dots, T;$$

$$X_{k,p}^l, I_{k,p}^l, SX_{k,l,p}^l, OX_{j,k,q}^l \geq 0;$$

$$Y_{n,k,t} \in \{0, 1\};$$

$l \in O_k, k \in P_{r_n}, t = 1, 2, \dots, T, n = 1, 2, \dots, N$ 。
其中: 式(9)表示整个供应链系统的目标函数; 式(10)反映了上下游企业间的物料平衡约束, 保证在供应链中上游企业的供货量必须满足下游企业的需求量。模型中 N 表示供应链中企业的总数目。在整个供应链的生产计划模型中, 只有约束(10)反映了供应链企业之间的耦合关系。

1.4 模型的分析 and 求解

拉格朗日松弛法是一种已经获得广泛应用的优化算法, 其基本原理是利用拉格朗日因子, 松弛掉原问题中难以处理的约束, 将问题变为较易解决的拉格朗日问题, 并通过求解拉格朗日问题逐步逼近获取原问题的最优解。本文这个生产计划模型中, 使用拉格朗日因子松弛掉各企业之间的耦合关联约束式(10), 以便将整个供应链上的集中决策问题分解为每个企业内部独立的生产计划决策问题。

引入拉格朗日因子 λ , 松弛掉整个供应链系统模型(模型 2)中的约束(10), 得到供应链系统最优的拉格朗日问题, 用模型 3 来表示。

模型 3

$$\min TCC = \sum_k C_k +$$

$$\sum_p \sum_{k \in P_k} \sum_{l \in L_k} \sum_t \lambda_{k,l,p}^t (OX_{l,k,q}^l - SX_{k,l,p}^l). \quad (11)$$

$$\text{s. t. } I_{k,p}^{l-1} + X_{k,p}^l - I_{k,p}^l = \sum_{l \in L_{k,p}} SX_{k,l,p}^l + d_{k,p}^l,$$

$$p \in P_k, t = 1, 2, \dots, T;$$

$$\sum_{j \in J_{k,q}} OX_{j,k,q}^l = \sum_{p \in P_k; bom_{q,p} \neq 0} bom_{q,p} X_{k,p}^l,$$

$$q \in Q_k, t = 1, 2, \dots, T;$$

$$\sum_{p \in P_k} a_{p,m} \leq Cap_{k,m} + E_{k,m}^l, t = 1, 2, \dots, T;$$

$$X_{k,p}^l \leq B_{k,p} Y_{k,p}^l, k \in P_{r_n}, t = 1, 2, \dots, T;$$

$$X_{k,p}^l, I_{k,p}^l, SX_{k,l,p}^l, OX_{j,k,q}^l \geq 0;$$

$$Y_{n,k,t} \in \{0, 1\};$$

$$l \in O_k, k \in P_{r_n}, t = 1, 2, \dots, T.$$

对式(11)进行整理, 合并属于一个企业的相关项, 则整个供应链的优化问题(模型 2)分解为 N 个企业的分散决策问题(模型 4)。

模型 4

$$\min CC_k = C_k + \sum_q \sum_{j \in J_{k,q}} \sum_t \lambda_{j,k,q}^t OX_{j,k,q}^l -$$

$$\sum_k \sum_{l \in L_{k,p}} \sum_t \lambda_{k,l,p}^t SX_{k,l,p}^l. \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
 \text{s. t. } & I_{k,p}^{t-1} + X_{k,p}^t - I_{k,p}^t = \sum_{l \in P_{k,p}} SX_{k,l,p}^t + d_{k,p}^t, \\
 & p \in P_k, t = 1, 2, \dots, T; \\
 & \sum_{j \in J_{k,q}} OX_{j,k,q}^t = \sum_{p \in P_k, \text{ bom}_{q,p} \neq 0} \text{bom}_{q,p} X_{k,p}^t, \\
 & q \in Q_k, t = 1, 2, \dots, T; \\
 & \sum_{p \in P_k} a_{p,m} \leq \text{Cap}_{k,m}^t + E_{k,m}^t, t = 1, 2, \dots, T; \\
 & X_{k,p}^t \leq B_{k,p} Y_{k,p}^t, k \in P_r, t = 1, 2, \dots, T; \\
 & X_{k,p}^t, I_{k,p}^t, SX_{k,l,p}^t, OX_{j,k,q}^t \geq 0; \\
 & Y_{n,k,t} \in \{0, 1\}; \\
 & l \in O_k, k \in P_r, t = 1, 2, \dots, T.
 \end{aligned}$$

式(12)中,拉格朗日因子表达了合理的经济意义, $\lambda_{k,q}$ 可以看作产品 p 所需原材料的采购价格, $\lambda_{k,l,p}$ 则可以看作企业产品 p 的销售价格。式(12)的重大意义在于,对于供应链上任何一个企业来说,当原材料的采购价格和企业产品的销售价格确定之后,模型 4 中的所有变量都是该企业的本地变量。

式(9)到式(12)的过程,从数学的角度上证明了这种采用拉格朗日松弛法进行分散决策的协同方法,能够得到实现供应链系统生产计划问题最优解的基本原理。对于如模型 4 的求解,很多文献都提出了很成熟的算法,本文借鉴文献[12]采用的次梯度算法,对相应的折扣价格(即拉格朗日因子)进行更新,使用 ILOG CPLEX 9.0 进行求解计算。

2 供应链生产计划协同过程的实现

2.1 供应链生产计划协同的过程

分散决策的供应链生产计划协同过程,是通过部署在企业信息系统平台上的 DMU 完成。所有的 DMU 分为两种: 1 处理整个协同流程的 DMU, 本文称之为全局 DMU; 0 求解每个企业独立决策问题的 DMU, 称为局部 DMU。全局 DMU 初始化各种产品的内部价格,并发送给供应链系统中的各个企业。企业获得内部价格后,本地 DMU 根据本地信息,计算各自的最优生产计划,确定原材料订货量和产品销售量,将决策变量反馈至全局 DMU。然后,全局 DMU 将根据各个企业的反馈数据,重新制定产品的内部价格,并再次发布。如此循环,最后得到最优的供应链生产计划。下面给出它们的控制逻辑。

全局 DMU 处理流程如图 3 所示,首先每个企业在客户端,通过普通浏览器连接到 Web 服务器。经身份验证后,服务器端发送初始化的拉格朗日因子 λ 到客户端。 λ 是一个二元列向量 $[\lambda_{k,q}, \lambda_{k,l,p}]'$, 其中 s 代表迭代的次数。经过客户端调用局部 DMU, 进行

本地的生产计划决策,并把决策变量($X = X_{k,p}^t, I_{k,q}^t, Y_{k,p}^t, E_{k,m}^t, OX_{j,k,q}^t, SX_{k,l,p}^t$) 发送给 DMU 模块求解拉格朗日问题,然后把最优解存入数据库,将结果数据输入终止判断模块。

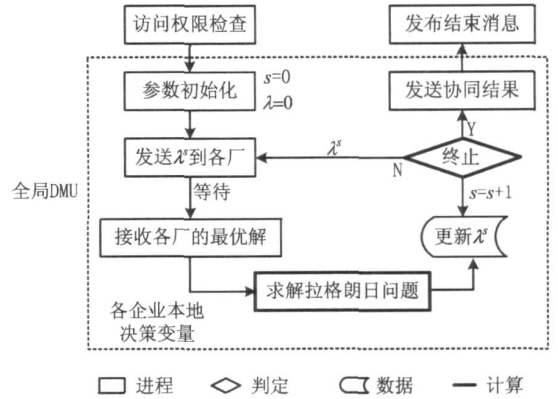


图3 全局DMU的处理逻辑

全局 DMU 的终止模块考察每两次迭代结果供应链总成本的差值,即 $TC^s - TC^{s-1}$ 的值。如果 $TC^s - TC^{s-1} < \epsilon$ (ϵ 为设定的终止控制量,为一较小值),则结果可以接受,终止协同程序,并向客户端发送结束消息;如果 $TC^s - TC^{s-1} \geq \epsilon$, 仍需进一步优化,则更新数据,把新的 λ 发送到各个企业,开始新一轮的迭代。

局部 DMU 有多个,每个企业调用相同的 DMU,对它的调用受到全局 DMU 的控制和引导。它的处理逻辑相对简单,如图 4 局部 DMU 的处理逻辑所示,把每次全局 DMU 传递的数据 λ 和企业输入的本地数据输入到企业的最优化模型(模型 4)中,然后求解混合整数线性规划问题。求解结束后把企业的本地结果 X^s 发送给全局 DMU,结束本次调用。

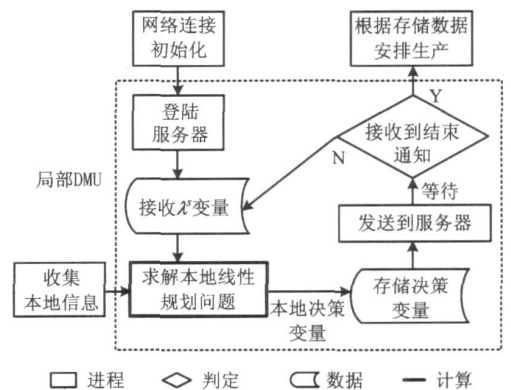


图4 局部DMU的处理逻辑

2.2 供应链企业间协调因子(即拉格朗日乘子)的更新

本文采用次梯度算法求解更新拉格朗日乘子。

次梯度优化(sub gradient optimization)算法的思想与非线性规划的梯度下降思想相同。拉格朗日对偶问题希望原问题的下界 $z_{LR}(\lambda)$ (即最优解) 尽可能大, 于是按 $z_{LR}(\lambda)$ 的上升方向逼近拉格朗日问题对偶问题的最优解 $z_{LD}(\lambda)$ 。次梯度优化算法就是根据 $z_{LR}(\lambda)$ 本身的分段线性而构造。

对于本文的生产计划模型, 次梯度算法的计算步骤如下:

步骤 1 任选一个值初始化拉格朗日因子 λ , $s = 0$ 。

步骤 2 对于 λ , 从 $\partial LR(\lambda)$ 中任选一个次梯度 φ 。若 $\varphi = 0$ 。则 λ 达到最优解而停止计算; 否则, $\lambda^{s+1} = \max\{\lambda + \theta\varphi, 0\}$, $s = s + 1$, 重复步骤 2。

在步骤 1 中, 初始化 λ 的取值最好根据产品历史价格选取, 从而减少迭代次数, 本文由于计算量较小, 取 $\lambda = 0$ 。

在步骤 2 中, 在如何选取 θ 和相应停止准则的问题上, 很多学者提出了各种各样的方法对次梯度算法进行优化, 主要包括 θ 和停止准则的选取。

(1) θ 的选取

采用 θ 以指数速度下降的方法, 其优化速度很快, 求解迭代次数较少, 适合计算量非常大的问题, 但是求解质量较差。

本文采用的方法是

$$\theta = \frac{z_{IP}(s) - z_{LB}(s)}{\|\varphi\|^2} \beta \quad (13)$$

式中: $z_{IP}(s)$ 为 IP 最优目标值的一个上界, 可以用一个可行解的目标值确定, 也可以通过估计的方法得到, 它可随 s 的变化逐步修正。 $z_{LB}(s)$ 是第 s 次迭代得到的(LD)最优值 $z_{LD}(\lambda)$ 的一个下界, 一般选取 $z_{LB}(s) = z_{LD}(\lambda)$, 但有时为了计算简单, 只取一个固定值。 $0 \leq \beta \leq 2$, 一般取 $\beta = 2$, 当 $z_{LR}(\lambda)$ 上升时, β 不变; 当 $z_{LR}(\lambda)$ 在二次迭代中没有变化时, 取其一半。

(2) 停止原则

对于算法的停止原则, 很多文献都给出了不同的方法。本文采用的停止原则方案是, 在生产计划协调模型的仿真计算中, 考虑计算的复杂性和数据量, 采用 λ 或目标值 $z_{LR}(\lambda)$ 在规定的步数内变化, 不超过一个给定的值。设判断因子 $\varepsilon = 0.001$, 如果 LD 满足 $CC^s - CC^{s-1} < 0.001$, 则认为目标值已经不再发生变化, 运算停止。

3 仿真计算与结果分析

3.1 仿真案例

某供应链系统结构如图 5 所示, 供应链中的企业分为 A, B, C, D 四级, 共有 10 个企业。图 5 纵坐标表示每个级别上的企业规模都不同, 横坐标表示上下游企业之间的生产关系, 箭头所指为每个企业生产的产品和所需的原材料。

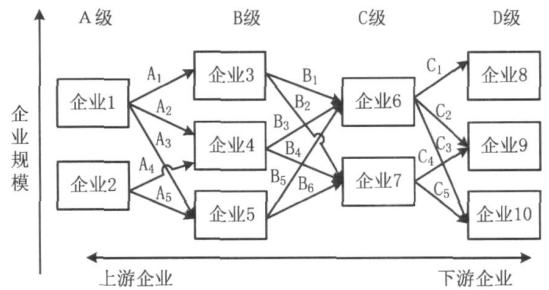


图5 多级、多企业、多产品的供应链结构

使用本文第 1 章的模型和变量对每个企业和整个供应链系统的生产计划最优化问题建模, 则每个企业具有自己的生产计划最优化目标函数(模型 4), 它是一个混合整数线性规划, 整个供应链系统的最优化目标是所有企业的供应链成本最小化(模型 2)。

对模型中的已知变量进行赋值。下面以企业 7 为例, 说明赋值的具体方式:

- (1) 假定每个企业每次安排四个周期的产量, 即 $T = \{1, 2, 3, 4\}$ 。
- (2) 企业 7 生产两种产品 C_4 和 C_5 , 即 $P_7 = \{1, 2\}$, 分别销往企业 9 和企业 10, 即 $L_{k,p} = \{9, 10\}$ 。
- (3) 它生产所需的原材料有 B_2, B_5, B_6 , 即 $Q_k = \{1, 2, 3\}$, 供应商有三个, 分别是企业 3、企业 4 和企业 5, 即 $J_{k,q} = \{3, 4, 5\}$ 。
- (4) 生产所需的资源有两种分别用于生产 C_4 和 C_5 , $M_7 = \{1, 2\}$ 。
- (5) 外部需求随机生成, 如表 1 所示。

表 1 企业 7 的外部需求

t	1	2	3	4
$d_{7,1}$	60	40	70	65
$d_{7,2}$	40	35	30	40

- (6) 常量的赋值如表 2 所示。

表 2 对企业 7 常量赋值

产品	恒量	$h_{7,p}$	$f_{7,q}$	$Cap_{7,m}^i$	$cv_{7,p}$	$cm_{7,m}$	$B_{7,p}$	$a_{p,m}$	$lom_{q,p}$		
									B ₂	B ₅	B ₆
1	C ₄	4	36	105	6	3	500	7	2	0	1
2	C ₅	5	40	140	9	5	550	9	1	2	0

3.2 模型优化过程

使用分散决策的方法对整个协同过程进行仿真,让这 10 个企业分别按照模型 4 进行独立决策,然后在 DMU 模块的控制下进行数据交换,经若干次迭代,最终使模型 2 达到最优的过程。整个计算过程按照以下步骤进行。

步骤 1 初始化所有变量。迭代次数 $s = 0$, $\lambda^0 = 0$, $\varepsilon = 0.001$, $TC^0 = 0$ 。

步骤 2 迭代启动。 $s = s + 1$ 。

步骤 3 终止判断。如式 TC^s 满足 $TC^s - TC^{s-1} < 0.001$, 则转步骤 6, 迭代停止, 上下游计划模型分别获得最优解; 否则, 转步骤 4。

步骤 4 使用拉格朗日松弛法将模型 1 转化为模型 4, 模型 4 是一个平面搜索问题, 利用次梯度算法求解, 得 $\lambda^{[12]}$ 。

步骤 5 循环过程。 $k = 1, \dots, 10$, 把模型 2 中每个企业的常量带入, 使用 CPLEX 9.0 分别对每个企业的模型求解, 得到每个企业的本地决策变量 X_k^s ($X_k^s = [X_{k,p}^i, I_{k,q}^i, Y_{k,p}^i, E_{k,m}^i, OX_{j,k,q}^i, SX_{k,l,p}^i]$, $t = 1, 2, 3, 4$), 经带入计算得到供应链总成本 TC^s 。这时完成一次迭代, 转步骤 2。

步骤 6 协同结束, 得到每个企业的决策变量 X^s 、生产成本 C_k^s 和供应链总成本 TC^s 。

3.3 结果与分析

首先考虑没有协同的情况, 因为当外部需求和销售价格确定的时候, 供应链中的每个企业的生产成本模型(模型 4)是可以求解的, 所以整个供应链的总成本也是确定的。按照供应链相邻企业的产品供应关系, 从低级别到高级别依次求解, 即 $D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ 的顺序, 分别确定每个企业的生产成本, 并得到供应链系统的总成本为 2 810 元。

使用基于拉格朗日松弛法进行分散决策的仿真计算中, 生产计划协同过程经七次迭代得到最优解。计算结果输出如图 6 所示。

从实验结果可以看出, 在每次迭代的过程中, 每个企业的供应链成本可能有所波动, 但供应链系统的总成本始终在下降, 最终得到的供应链总成本相

成本	企业1	企业2	企业3	企业4	企业5	企业6	企业7	企业8	企业9	企业10	总成本
1	268	241	386	351	195	255	224	388	332	218	2868
2	268	258	348	315	195	236	248	346	368	218	2776
3	288	231	348	298	192	236	231	322	368	218	2724
4	264	236	348	288	192	233	245	342	348	245	2789
5	264	228	352	326	192	248	233	342	328	196	2693
6	264	228	348	326	212	248	228	342	322	196	2682
7	264	228	345	324	208	248	222	342	328	196	2681

图 6 仿真计算结果输出

对于没有协同的情况下降了 5.332%。这样的结果说明, 该分散决策的协同方法可以很好地逼近最优解, 即每个企业在满足自身利益最大化的前提下, 通过平等协商的方式, 损失部分局部利益, 最终达到了供应链整体利益的最优化。

在与其他分散决策方法的比较方面, 本文选择与目前另外一个研究热点问题斯坦博格(Stackelberg)主从递归决策方法进行比较。使用文献[13]中的遗传算法, 求解 1 个主方、10 个从方的二层规划问题, 经过 50 次进化后, 遗传算法给出了 Stackelberg-Nash 均衡解。经过多次实验, 计算出遗传算法每次迭代的平均时间, 并把它作为单位时间, 标准化拉格朗日松弛法每次的迭代时间后, 把两种方法的协同结果反映在一张图上, 如图 7 所示。与没有协同的情况相比, 两种方法都具有很好的协同结果, 并且在结果上没有显著差异, 但拉格朗日松弛法在收敛速度上具有明显的优势。

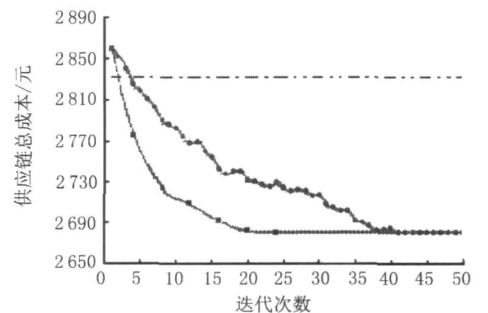


图 7 使用拉格朗日松弛法与主从递归决策的比较

在计算过程中发现,上下游间的交易价格,即拉格朗日松弛因子在一定外圈内调整时,整个供应链协同过程的迭代次数明显减少,收敛速度加快;当松弛因子超出此范围时,结果收敛较慢,可能导致振荡现象甚至不收敛的情况。由此可见,协同结果在一定程度上依赖于上下游间交易价格调整量的相互关系,为保证得到较好的协同结果和收敛速度,如何对每次迭代松弛因子的调整程度加以限制,以及松弛因子的灵敏度分析,将在今后进一步研究。

4 结束语

本文探讨了使用基于拉格朗日松弛法的分散决策方法实现多级供应链生产计划的协同问题。该方法将复杂供应链系统的生产计划协同问题分解为分散的独立决策和企业间平等协商的过程,从而很好地解决了集中决策的弊端。仿真结果表明,使用这种协同方法在复杂的供应链环境下可以很好地逼近最优值,并且在收敛速度上明显优于基于遗传算法的其他分散决策方法。

参考文献:

- [1] HOLWEG M, DISNEY S, HOLMSTROM J, et al. Supply chain collaboration: making sense of the strategy continuum [J]. *European Management Journal*, 2005, 23(2): 170-181.
- [2] SCHNEEWEISS C, ZIMMER K. Hierarchical coordination mechanisms within the supply chain [J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 153(3): 687-703.
- [3] SCHNEEWEISS C. Distributed decision making—a unified approach [J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 150(2): 237-252.
- [4] SCHNEEWEISS C. Distributed decision making in supply chain management [J]. *International Journal of Production Economics*, 2003, 84(1): 71-83.
- [5] ZHANG Cuihua, REN Jinyu, YU Haibin. The research progress of collaborative supply chain management [J]. *System Engineering*, 2005, 23(4): 1-6 (in Chinese). [张翠华, 任金玉, 于海斌. 供应链协同管理的研究进展 [J]. *系统工程*, 2005, 23(4): 1-6.]
- [6] LU Zhen, HUANG Xiaoyuan. Study on stackelberg game of supply chain coordination with uncertain delivery [J]. *Journal of Management Science*, 2004, 7(6): 87-93 (in Chinese). [卢震, 黄小原. 不确定交货条件下供应链协调的 Stackelberg 对策研究 [J]. *管理科学学报*, 2004, 7(6): 87-93.]
- [7] ZHU Baolin, YU Haibin, HUANG Xiaoyuan. Collaboration planning modeling based on game theory for supply chain [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2004, 25(7): 703-706 (in Chinese). [朱宝琳, 于海斌, 黄小原. 供应链计划建模中的博弈方法 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2004, 25(7): 703-706.]
- [8] ZHA Dunlin, WANG Ningsheng. Integrated supply chain system based on service multi Agents [J]. *Computers Engineering*, 2004, 30(7): 28-30 (in Chinese). [查敦林, 王宁生. 基于服务多代理的集成供应链系统 [J]. *计算机工程*, 2004, 30(7): 28-30.]
- [9] SERGIO T, SERGIO C. Simulation in the supply chain context: a survey [J]. *Computers in Industry*, 2004, 53(1): 3-16.
- [10] ERTOGRAL K, WU S D. Auction theoretic coordination of production planning in the supply chain [J]. *IIE Transactions*, 2000, 32(10): 931-940.
- [11] DUDEK G, STADTLER H. Negotiation based collaborative planning between supply chains partners [J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 163(3): 668-687.
- [12] LI Zhihua, WANG Qifu, ZHONG Yifang, et al. Research on modeling and algorithm for material flow network design problem [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(2): 84-89 (in Chinese). [李志华, 王启富, 钟毅芳. 物流网络设计建模与求解算法研究 [J]. *机械工程学报*, 2003, 39(2): 84-89.]
- [13] LIU Baoding, ZHAO Ruiqing, WANG Gang. Uncertainty programming and its application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 8-22 (in Chinese). [刘宝碁, 赵瑞清, 王纲. 不确定规划及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 8-22.]