

文章编号: 1001-0920(2007)12-1363-05

串行供应链最优控制优化模型

黄 敏^{a,b}, 丁剑琴^{a,b}, 刘中华^{a,b}, 王兴伟^a

(东北大学 a. 信息科学与工程学院, b. 流程工业综合自动化重点实验室, 沈阳 110004)

摘 要: 最优控制策略的确定是供应链成败的关键因素之一, 为此对串行供应链库存控制策略进行研究. 首先提出了基于非线性整数规划与推拉控制通用模型相结合的串行供应链库存控制优化模型; 然后利用遗传算法与仿真分析相结合的方法确定最优控制策略. 实例仿真验证了该方法的有效性.

关键词: 供应链管理; 存储控制; 遗传算法; 推式控制; 拉式控制

中图分类号: F273

文献标识码: A

Optimal control strategy of serial supply chain

HUANG Min^{a,b}, DING Jian-qin^{a,b}, LIU Zhong-hua^{a,b}, WANG Xing-wei^a

(a. College of Information Science and Engineering, b. Key Laboratory of Integrated Automation of Process Industry, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: HUANG Min, E-mail: huangmin@ise.neu.edu.cn)

Abstract: The determination of the optimal control strategy is one of the key factors for the success of supply chain management. Therefore, the control strategy of serial supply chain is studied. First, the optimal model of the serial supply chain inventory control is proposed based on the nonlinear integer programming model combined with the general push/pull control model. Then, the optimal control strategy is obtained by integrating the genetic algorithm and simulation. Case study shows the effectiveness of the method.

Key words: Supply chain management; Inventory control; Genetic algorithm; Push control; Pull control

1 引 言

经济全球化以及计算机与通信技术的发展, 使企业面临着新的机遇和挑战. 在这种背景下, 供应链的概念应运而生^[1,2].

供应链管理(SCM) 主要是通过控制和协调供应链中的各个实体及其行为, 以达到降低系统成本、提高产品质量和改善服务水平等目的, 从而全面提高整个系统的综合竞争力. 库存管理在供应链管理中占据着举足轻重的地位. 企业的库存控制策略直接影响到生产成本. 通常库存优化的目标是在实现对客户满意度的同时, 使得成本最小^[4].

生产/库存系统通常可分为推式系统和拉式系统. 目前世界上运用得最广泛的两种生产库存控制方法——制造资源计划(MRP II)和准时制造(JIT)就分属于这两种系统. 推式生产控制系统采用集中控制方式, 通过对未来需求的预测来组织生产, 因此

必须对生产提前期进行估计. 拉式生产控制系统采用分散式控制方式, 根据实际需求来组织生产^[4]. 两类方法各有优点^[5,6], 人们试图将二者结合起来, 以获得更优越的性能^[7-9]. Spearman 等提出的 CONWIP 就是一种推拉结合的控制方法^[10]. Oscar 等提出了串行供应链 CONWIP 控制系统模型, 并给出了对应的仿真研究分析^[11].

到目前为止, 供应链库存控制系统的研究都是针对特殊单一的控制策略, 如拉式、推式、典型推拉结合的 CONWIP^[10,12] 控制系统或推拉组合系统, 还没有关于推拉结合控制策略的一般通用模型和分析. 本文的目标是通过建立串行推拉式通用控制模型及优化模型, 为串行供应链库存系统提供最优控制策略.

如同 Kanban 和 CONWIP 系统中系统的性能主要依赖于看板数量一样, 在串行推拉式通用系统

收稿日期: 2006-01-17; 修回日期: 2007-07-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70671020, 70431003, 60673159, 70721001); 国家高技术研究发展计划项目(2006AA01Z214); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-05-0295, NCET-05-0289).

作者简介: 黄敏(1968—), 女, 福建长乐人, 教授, 博士生导师, 从事生产计划、调度与控制以及企业风险管理等研究; 丁剑琴(1979—), 女, 南昌人, 硕士生, 从事供应链最优控制策略的研究.

中,流通卡分布(即各阶段的流通卡数)决定了通用系统的控制模式,指导着通用系统的生产时间和数量.因此,流通卡的确定便成为影响串行供应链通用库存系统运行效果的关键因素.

本文针对多阶段串行的供应链库存控制系统,提出了基于非线性整数规划和串行供应链库存的推拉式通用模型相结合的最优控制优化模型,并提出了利用遗传算法和仿真分析的流通卡分布确定方法.研究实例表明,基于遗传算法获得的结果是合理而有效的.

2 问题描述

如图 1 所示,假设整个串行供应链上有 N 个节点,分别代表原材料供应商、制造商、分销商、零售商和客户等各个上下游节点企业.供应链的最终目标是为了满足客户的需求,故每个企业都在通用的推拉式库存机制控制下进行生产和销售.即每个节点企业都受其上游企业原料供应和下游企业需求的影响而进行生产.供应链的一个重要目的是使链上的企业达到共赢的局面,使整个供应链的利润最大,而不是追求某一企业的利润最大化.

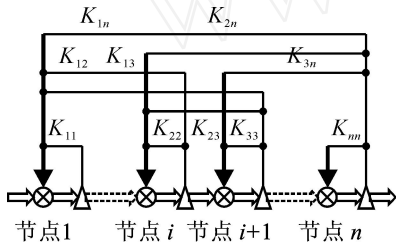


图 1 推拉混合式串行供应链库存控制

为了控制整个供应链上的在制品数量,在每个下游企业 j 与上游企业 i ($j \geq i$) 之间设定一个在制品水平,记为流通卡数 K_{ij} . 只有当节点企业 i 与其任意下游企业 j ($j \geq i$) 的实际在制品数量 $k_{ij} < K_{ij}$ 时,才允许该企业投产,节点企业 i 的允许投入量为 $\min_{j \geq i} \{K_{ij} - k_{ij}\}$. 一旦 Δ 个标准容器产品被允许在节点企业 i 中投产,则 $k_{ij} + \Delta$ ($\forall j \geq i$),此节点的空流通卡就附着在其制造容器上;当产品加工完毕,运送到节点企业 j 后, $k_{ij} - \Delta$ ($\forall j \geq i$),附着在其上的流通卡才与其分开,作为空流通卡返回节点企业 i ,以授权对其他产品的加工.当 $K_{ij} = \infty$ 时,表示下游节点 j 对上游节点 i 无反馈控制.如果所有下游节点对节点 i 均无反馈控制,则节点 i 的控制为推式控制.

假设串行供应链满足以下特性和假设:

- 1) 顾客需求服从具有上下限的正态分布;
- 2) 供应链只制造单一类型产品;
- 3) 生产企业在某一节点输出返回的任何流通卡,对该节点所有上游企业立即可得(没有返回延迟);

迟);

- 4) 企业在供应链初始节点的原料供应充足.

这里要解决的问题是:在满足客户满意度和投放定单标准差约束的条件下,如何选择适当的控制策略,使得供应链总成本最小.

3 控制策略仿真模型的建立

为了描述方便,首先给出 2 个定义:

定义 1 流通卡矩阵 K 中的元素 K_{ij} 表示下游节点 j 到上游节点 i 的控制环中允许投入的流通卡数; $K_{ij} = \infty$ 代表节点 j 对节点 i 无拉式控制.由于各节点只受其下游节点的控制,矩阵的下半部分无意义.本文将矩阵下三角部分的元素值定义为 -1 ,即

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$K_{ij} = \begin{cases} -1, & i > j; \\ 1 \sim K_{ij}^u + 1, & i \leq j. \end{cases} \quad (2)$$

其中: K_{ij}^u 代表流通卡数的上限, K_{ij}^u 代表 $+$ ∞ .

定义 2 控制模式的描述矩阵 M 为

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \dots & M_{1n} \\ M_{21} & M_{22} & \dots & M_{2n} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ M_{n1} & M_{n2} & \dots & M_{nn} \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$M_{ij} = \begin{cases} 1, & K_{ij} \neq K_{ij}^u + 1; \\ 0, & K_{ij} = K_{ij}^u + 1; \end{cases} \quad i \leq j. \quad (4)$$

矩阵 M 表示的是供应链上每个节点对之间为哪种控制策略, M 为 0-1 矩阵. M 中的元素 $M_{ij} = 1$ 表示下游节点 j 对上游节点 i 有拉式控制; $M_{ij} = 0$ 表示下游节点 j 对上游节点 i 无拉式控制.

性质 1 当矩阵 M 的 i 行的所有元素之和为 0 时,代表节点 i 的下游所有节点对它均无拉式控制.此时节点 i 受到其上游节点的推式控制.

可见,要确定所采用的控制策略,只需确定流通卡矩阵 K . 根据问题的需要,采用两级模型的方式:第 1 级模型采用非线性整数规划模型,描述在客户满意度 F_{n0} 和投放定单的标准差 SDO_0 的约束条件下,确定供应链系统的平均供应链总成本最小的流通卡分布优化问题,即求解 K 矩阵的各元素 K_{ij} . 模型描述如下:

目标函数

$$\min(ACR(K)); \quad (5)$$

$$\text{s. t. } F_r(K) \geq F_{n0}; \quad (6)$$

$$SDO(K) \leq SDO_0; \quad (7)$$

$$K_{ij} = \begin{cases} -1, & i > j; \\ 1 \sim K_{ij}^u + 1, & i \leq j. \end{cases} \quad (8)$$

其中 $ACR(K)$, $F_r(K)$ 和 $SDO(K)$ 分别为流通卡矩阵为 K 时,供应链的总成本、顾客满意度和投放定单的标准差.在第 1 级模型中,这 3 个参数不能直接给出,需通过整个串行供应链库存系统的仿真模型(即第 2 级模型)来确定.具体描述见图 2.

仿真模型中各变量含义如下:

(1) 物流变量

- P_t^i : 周期 t 节点 i 的在制品量;
- Y_t^i : 周期 t 节点 i 的成品库存;
- S_t^i : 周期 t 节点 i 到 $i + 1$ 的运输量;
- O_t^i : 周期 t 节点 i 的成品输出量;
- I_t^i : 周期 t 节点 i 的原料输入量;
- X_t^i : 周期 t 节点 i 的实际可用原料量.

(2) 信息流变量

- OP_t^{cust} : 周期 t 的顾客需求;
- D_t^i : 周期 t 节点 i 的进来定单量;
- APC_t^i : 周期 t 节点 i 的可用卡数;
- OP_t^i : 周期 t 节点 i 的处理定单量(投产量);
- B_t^n : 周期 t 节点 n 的积压定单量;
- DS_t^i : 周期 t 节点 i 到 $i + 1$ 的期望运输量;
- TY_t^i : 周期 t 节点 i 的可用总成品量;
- L^i : 节点 i 的产品生产周期;
- LS^i : 节点 i 的产品运送周期;
- MLP^i : 节点 i 的生产负荷能力.

根据以上变量关系,定义以下性能指标:

1) 满意率 (%) (即供应链的服务水平): 供应链的满意率只考虑最终节点的满意率

$$F_r = \frac{100 \left(\sum_{t=1}^T D_t^N - B_t^N \right)}{\sum_{t=1}^T D_t^N}; \quad (9)$$

2) 投放定单的标准差

$$SDO = \sqrt{\frac{1}{N(T-1)} \sum_{t=1}^T \left(OP_t^1 - \sum_{t=1}^T OP_t^1 / T \right)^2}; \quad (10)$$

3) 供应链的总成本

$$ACR = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N CR_t^i}{T}, \quad (11)$$

其中 CR_t^i 为周期 t 节点 i 的成本.

对应于问题的模型,第 1 级模型通过优化确定各节点的流通卡分布,从而确定控制策略,并向第 2 级模型传递这一参数;第 2 级模型通过仿真确定客户的满意度、投放定单的标准差和供应链总成本,并向第 1 级模型传递这 3 个参数.

4 模型求解

4.1 第 1 级模型

第 1 级模型是组合问题和整数规划问题的混合模型.假设有 n 个节点企业,则需要确定的流通卡数为 $n(n+1)/2$ 个.节点企业 i 受节点企业 j 控制的供应链上允许的最大流通卡数为 K_{ij}^u ,则搜索空间将有 $\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n (K_{ij}^u + 1)$ 种状态.要对每种状态进行枚举,只有在供应链规模和流通卡数量均很小的情况下才可行.对于实际问题,需要寻求启发式方法来加以解决.由于遗传算法^[13]在解决优化问题上的优势,在此采用遗传算法求解第 1 级模型.

(1) 基因编码

根据问题的特点采用整数编码方式,个体的每一位依次代表矩阵 K 中上三角部分元素,共有 $n(n+1)/2$ 位.具体编码方式如图 3 所示.其中每一位的取值范围是 $1 \sim K_{ij}^u + 1$, K_{ij}^u 根据各生产节点的能力来确定.例如某供应链,第 1 节点的生产能力是 30,则 $K_{11}^u \geq 30$.若第 2 节点的生产能力是 20,由于 K_{12}^u 为包含第 1 和第 2 两个节点控制环的卡数上限,则 $K_{12}^u \geq (30 + 20)$.用 $K_{ij}^u + 1$ 代表无穷大的整数,表示对应该节点 i 的下游节点 j 对它无流通卡数的限制.

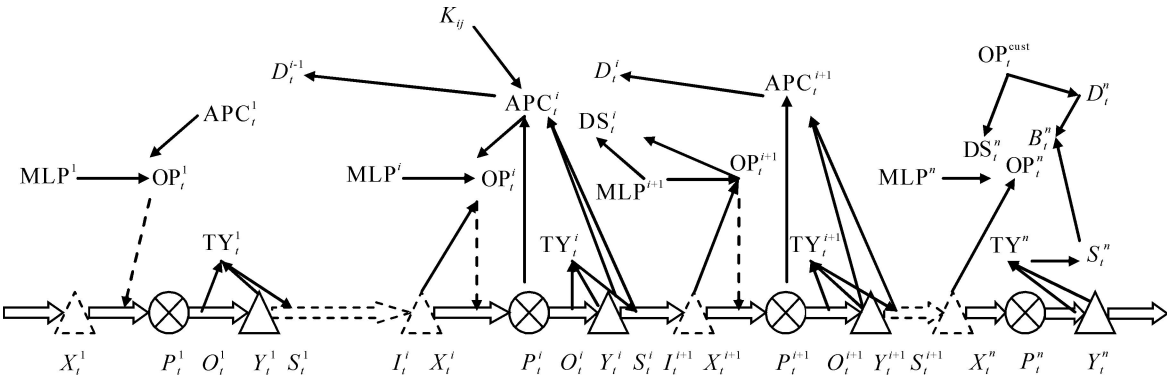


图 2 节点变量关系

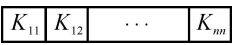


图 3 基因编码方式

(2) 适应函数

所要解决问题的目标函数是极小化函数,因此可用一个较大的数 $f_{\max}$ 减去目标函数作为适应函数,即

$$F(K) = f_{\max} - f(K), \tag{12}$$

$$\begin{aligned} f(K) = \\ \text{ACR}(K) + \alpha_1 [\text{SDO}(K) - \\ \text{SDO}_0 J^* + \alpha_2 [F_0 - F_r(K)]^*]. \end{aligned} \tag{13}$$

其中: $\alpha_1 [\text{SDO}(K) - \text{SDO}_0 J^* + \alpha_2 [F_0 - F_r(K)]^*$ 是对不满足约束(6)和(7)的惩罚, α_1 和 α_2 是惩罚系数; $f_{\max}$ 是给定的一个充分大的数,以确保适应值总为非负.

(3) 初始解的产生

初始解的每一位,在 $1 \sim K_{ij}^u + 1$ 的范围内随机生成一个整数.

(4) 遗传算子的确定

交叉:该算法采用的是两点交叉,即在染色体中选取两个交叉点,将位于两个交叉点之间的部分进行交换,其余部分仍然继承父代基因.

变异:这里的变异是对染色体中的每一位随机产生一个 0-1 之间的数,当此数小于变异概率时,对该位进行变异操作,直接在该位随机产生一个介于本位流通卡数上下限范围之间的整数.

(5) 选择策略的确定

采用常用的基于概率选择的转轮机制作为选择策略.

(6) 算法停止准则

选择最大代数作为算法的停止准则.

(7) 优选机制

为在下一代中保留最好的染色体,在选择过程中加入了优选机制.即如果上一代中的最好染色体没有被复制到下一代,则从下一代中随机去掉一个染色体,并将上一代中的最好的染色体直接复制到下一代.

4.2 第 2 级模型

第 2 级模型采用仿真的方法,确定在给定流通卡分布参数 K_{ij} 下的供应链系统各项性能指标,即客户满意度、投放定单的标准差和供应链总成本.

4.3 模型求解流程

求解过程主要流程如下:

- 1) 利用遗传算法产生初始解种群,得到每个节点企业受其下游各节点企业推式或拉式控制的流通卡数量,即控制矩阵 K ;
- 2) 将控制矩阵 K 输入仿真系统仿真,得到 3 项经济指标;
- 3) 计算每个个体的适应值,保留最优解;
- 4) 进行选择、交叉和变异;
- 5) 如果满足终止条件,则求解终止;否则,转步骤 2).

5 实例仿真

为验证上述基于遗传算法和库存控制通用模型方法的有效性,对不同供应链库存系统进行仿真验证.供应链库存系统如图 2 所示,在约束条件下确定了最优卡的分布状况,即选择了最优控制策略.

采用达优率和最优解偏差比率作为算法的评价指标.将遗传算法在不同参数设定时所搜索到的问题最大值作为该问题的最优解,以确定算法的达优率.最优解偏差比率定义为:调整各种参数后发现的 最大适应值与不同参数情况下用遗传算法所搜索到的 优解的偏差 Δf 与最大适应值 f^* 的比值 $\Delta f / f^*$ 的百分比.

通过大量的仿真实验,可确定对于此类问题,合理的参数组合为:交叉率 $P_c = 1.0$,变异率 $P_m = 0.3$,种群数 $N_P = 200$,最大代数 $N_G = 150$.

为了分析问题规模对算法性能的影响,考虑含 4 节点和 6 节点企业的串行供应链.两问题的对比结果如表 1 所示.

从表 1 可以看出,6 节点问题比 4 节点问题规模扩大了 10^{22} 倍,CPU 时间增加了 18 s,达优率下降了 6%,这是由于问题复杂度扩大而引起的.相对于规

表 1 问题规模对达优率的影响

问题规模	N_P	N_G	P_c	P_m	$\Delta f / f^* / \%$	最优解	达优率	CPU 时间 t / s
10^{18} (4 节点)	2	1						
	0	5	1.0	0.3	0.000 00	892 611.490 234	0.92	21
	0	0						
10^{40} (6 节点)	2	1						
	0	5	1.0	0.3	0.000 00	890 379.745 117	0.86	39
	0	0						

模扩大的程度,算法仍具有较高的达优率,且CPU时间的增加在可接受的范围内.时间的增加主要是由于问题规模扩大对仿真过程的影响产生的,但算法的达优性并未受到太大的影响,算法比较稳定.

6 结 论

本文针对串行供应链库存控制策略进行研究,提出了两级模型的描述方法.第 1 级模型为非线性整数规划模型,是在客户满意度不低于要求标准和投产标准差小于给定值的约束条件下,确定使供应链的总成本达到最小的控制策略;第 2 级模型是在确定的库存控制策略下,得到 1 级模型中供应链的各项经济指标.第 2 级模型的特点是根据供应链上的节点是否受其下游节点的反馈控制,决定本节点采取的是推式控制还是拉式控制.两级模型为串联供应链库存系统最优控制提供了描述方法,为最优控制策略的确定提供了有效的数学工具.

根据问题的特点提出了遗传算法与仿真分析相结合的流通卡数求解方法:第 1 级模型通过遗传算法进行优化,第 2 级模型通过仿真确定特定控制策略下的各项性能指标.通过对不同规模实例的仿真对比分析,验证了该方法的有效性,在满足客户需求和消除牛鞭效应的情况下,可使整条供应链上的成本达到最小,从而为供应链各节点企业协调生产节奏,合理组织采购、生产、运输和销售提供了量化依据.

参考文献(References)

- [1] 蓝伯雄,郑晓娜,徐心. 电子商务时代的供应链管理[J]. 中国管理科学, 2000, 8(3): 17.
(Lan Bo-xiong, Zheng Xiao-na, Xu Xin. Supply chain management in E-commerce era [J]. Chinese J of Management Science, 2000, 8(3): 17.)
- [2] 赵林度. 电子商务理论与实务[M]. 北京:人民邮电出版社, 2001: 1-10.
(Zhao Lin-du. Theory and practice of electronic commerce [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 2001: 1-10.)
- [3] 赵林度. 供应链与物流管理理论与实务[M]. 北京:机械工业出版社, 2003: 34-36.

- (Zhao Lin-du. Theory and practice of supply chain and logistics management[M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, 2003: 34-36.)
- [4] Gstettner S, Kuhn H. Analysis of production control systems Kanban and CONWIP[J]. Int J of Production Research, 1996, 34(11): 3253-3273.
- [5] Deleersnyder J L, Hodgson T J, Mueller H, et al. Kanban controlled pull system: Analysis approach[J]. Management Science, 1989, 35(9): 1079-1091.
- [6] Sarker B R, Fitzsimmons J A. The performance of push and pull systems: A simulation and comparative study [J]. Int J of Production Research, 1989, 27(11): 1715-1732.
- [7] 黄敏,王兴伟,汪定伟. 多阶段 CONWIP 系统流通卡分布的确定方法[J]. 控制与决策, 2000, 15(6): 686-689.
(Huang Min, Wang Xing-wei, Wang Ding-wei. Card number distribution determination method for multi-stage CONWIP systems [J]. Control and Decision, 2000, 15(6): 686-689.)
- [8] Larsen N E, Alting L. Criteria for selecting production control philosophy [J]. Production Planning and Control, 1993, 4(1): 54-68.
- [9] Villa A, Watanabe T. Production management: Beyond the dichotomy between "Push" and "Pull" [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 1993, 6(1): 53-63.
- [10] Spearman M L, Woodruff D L, Hopp W J. CONWIP: A pull alternative to Kanban[J]. Int J of Production Research, 1990, 28(5): 879-894.
- [11] Oscar R, Adolfo C M. Exploring the utilization of a CONWIP system for supply chain management[J]. Int J of Production Economics, 2003, 83(2): 195-215.
- [12] Herer Y T, Masin M. Mathematical programming formulation of CONWIP based production lines and relationships to MRP [J]. Int J of Production Research, 1997, 35(4): 1067-1076.
- [13] Holland J. Adaptation in nature and artificial systems [M]. Michigan: The University of Michigan Press, 1975.