

基于免疫遗传算法的供应链库存协同优化研究

闫 军¹ 丁鑫培¹ 刘永瑞²

(兰州交通大学机电技术研究所 兰州 730070)¹ (中国人民解放军 66292 部队 邯郸 056000)²

摘 要 在全球经济一体化发展的大背景下,企业之间的竞争方式发生了本质上的改变,即已由原来单个企业之间的竞争变为企业间所在供应链之间的竞争。在这种竞争方式下,企业逐步向追求整个供应链利益的最大化转变。针对供应链整体协同运作来有效控制库存的问题,建立了多级库存供应链模型,运用改进的免疫遗传算法对所建的供应链多级库存模型进行优化求解;并以西部某实木家具公司的 P1 和 P2 产品为例,结合所建立的多级库存成本优化模型和相应的算法设计,运用 Matlab 数学仿真软件仿真求解。

关键词 供应链库存,协同优化,免疫遗传算法

中图分类号 TP391.09 文献标识码 A

Research on Collaborative Optimization of Supply Chain Inventory Based on Immune Genetic Algorithm

YAN Jun¹ DING Xin-pe¹ LIU Yong-rui²

(Institute of Electromechanical Technology, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)¹

(Chinese People's Liberation Army 66292, Handan 056000, China)²

Abstract With the global economic integration, the competition between enterprises has been altered essentially from the competition between individual enterprises to the competition of the supply chains among enterprises. This new mode of competition gradually urges the enterprises to maximize the profits of the whole supply chain. The author aimed to explore how can the inventory be effectively controlled under the collaboration running of the supply chain by establishing a multi-level supply chain model of inventory and using the improved immune genetic algorithm to find optimized solution to the established model. This study took the P1 and P2 produced by a solid wood furniture company located in the western areas of China as examples, combined the established multi-level inventory model of cost optimization and the corresponding algorithms, and used MATLAB simulation software to find solutions.

Keywords Supply chain inventory, Cooperative optimization, Immune genetic algorithm

1 引言

随着世界经济的一体化发展,企业间的竞争加剧,越来越多的企业开始寻求一种供应链可以采用的协作管理方法来进行双优或多方最优博弈,以追求更多的利润^[1]。供应链多级库存在衔接供应链运作以及降低缺货成本等方面发挥着重要作用,与此同时供应链多级库存也引发了货物积压、周转不灵活等问题。因此,为了提高整体运作供应链的协同性,对供应链中的库存进行优化研究是十分必要的。

在供应链库存领域国内外已经进行了许多研究,国外的 Clark 和 Scarf 于 1960 年对多级库存进行了开创性的研究,并首先提出了“级库存”的概念:供应链的级库存 = 某一库存节点现有的库存 + 转移到或正在转移到后续节点的库存^[2]; Moinzadeh 和 Aggarwal 研究了串行系统供应链的具有加急订单处理机制的多级库存模型^[3]; Khouja 考虑了可以有多个

配送客户的供应商构成的三阶供应链库存结构^[4]; Ronald 提出了订购成本、库存持有成本、缺货成本 3 类的库存成本,其中订购成本规定与订购次数有关,指采购产品产生的相关成本,但与订购的数量无关,相关费用还包括货物接收与验收成本、固定采购成本等^[5]。国内的葛显龙等人以供应链集成为思想基础,将库存和运输问题进行整合优化研究^[6]。综上所述,大部分研究集中在考虑顾客需求控制在一定范围、时间内的随机需求和单目标库存成本最低情况下的库存优化问题,而对多目标协同优化问题进行的研究较少。作者根据供应链库存控制的基础理论建立了多级库存供应链模型,选择免疫遗传算法作为求解算法,对交叉算子和变异算子进行自适应改进,运用改进后的算法对所建的供应链多级库存模型进行求解。最后,以西部某实木家具公司的 P1 和 P2 产品为例,结合多级库存成本、服务质量优化模型进行相应的算法设计,运用 Matlab 数学仿真软件仿真求解。

本文受国家科技支撑计划项目(2012BAH20F05),甘肃省高等学校基本科研业务费项目([2012]129 号)资助。

闫 军(1971—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为区域物流协同、物流系统规划;丁鑫培(1990—),男,硕士生,主要研究方向为载运工具运用工程;刘永瑞(1987—),男,硕士,主要研究方向为机械电子工程。

2 问题描述

现实情况中,研究者以供应链多产品、多周期、多目标为研究特点,以供应商、核心制造商、分销中心、零售点4级供应链构成的网状结构作为多级库存的研究对象。整条供应链上,供应商持有原材料和半成品,成品库存分布在核心制造商、分销中心和零售点,部分核心制造商也持有半成品。顾客需求是供应链中产品需求的源头,存在不确定性和随机性,同时各级节点企业引入安全库存,以保证自身正常运营的持有量。根据以上库存情况,在模型建立的过程中,各级节点均采用 (t, R, S) 补货策略,在时间 t 进行检测时,若库存量 I 小于 R ,订货量为 $S-I$ 。各级节点企业在周期 T 下进行整个供应链的运作,在每一周期内,以各级节点持有量、发货量、订货量计算持有成本、订购成本、运输成本、交易成本、生产成本,从而得出整个产业供应链的总成本即各节点企业涉及的成本之和,在考虑成本的同时兼顾服务质量。在符合生产、库存量、需求随机的前提下,运用中心化控制方法建立基于成本相对最低和顾客满意水平相对最高的多级库存控制模型。

3 多级库存多目标优化模型的建立

3.1 多级库存的结构模式及运作流程

如图1所示,作者以“供应商、制造商、分销商和零售商”4个层级为研究对象。该供应链以制造型企业为核心,以供应商为供应网络并以分销商为分销网络,原材料从上游供应商发出,经制造商加工后运送至分销商,再经过零售商销售,最终到达客户手中;而需求信息则是根据零售商自身的库存水平和市场顾客的实际需求等发出,经过分销商、制造商,最终传到供应商,然后根据订单情况,向外部供应链发出订单,根据以上运作流程,对部分条件进行假设。

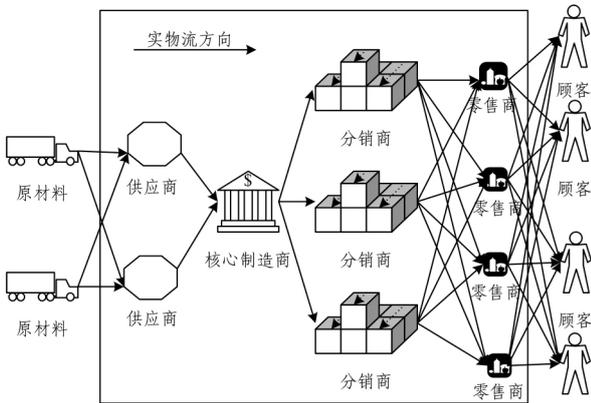


图1 供应链结构模型

3.2 模型的假设条件

(1)该供应链的核心企业为一个制造商,且该制造商单位时间内的产量是一个定值,核心企业生产多种产品的生产线相互独立,每一种产品生产只需要一种原材料;(2)零售商的单位库存持有费用要小于单位缺货费用;(3)供应链是从供应商到制造商,经分销中心,最后经过零售商到终端消费者手中;(4)制造商只向一个供应商订购所需原材料(半成品),而供应商则可以产多种原材料(半成品);(5)周期性盘点,供应商的上级供应商供给能力无上限,可以瞬时补充供应商的原

料需求,优先供给各节点的缺货,各级节点固定订货提前期相同;(6)按照基本时间段 T 划分系统时间,假设基本周期 T 为一天,系统周期数为 K , K 为30;(7)库容能力在各级节点上有所不同,但每级节点库存容积有限。

3.3 面向随机需求的多级库存多目标优化模型的建立

本文的优化目标是通过合理的库存策略使供应链总库存成本和产品对顾客的服务水平两个目标得以优化。通过对订购点库存量、库存转移、级库存量环节的分析,以及对多级库存系统服务质量的界定,可以得出基于成本相对最低与服务质量相对较高的一个多目标多周期的混合整数规划多级库存控制模型。其中,式(3)表示各节点的订货量要大于各节点设置的订货点;式(4)表示各节点的库存容积限制,即最大订货量不能超过最大库存量;式(5)表示零售商、分销商、制造商、供应商的库存量为非负数。

$$\text{Min}(C_{total}) = \text{Min}(C_m + C_h + C_t + C_o + C_s) \quad (1)$$

$$\text{Max}(Sat) = \text{Max}\left(1 - \frac{1}{KRP} \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R \sum_{p=1}^P \frac{D_{rk}^p}{Q_{rk}^p}\right) \quad (2)$$

$$s_{*i} < Q_{*i} \quad * \in s, m, d, r \quad (3)$$

$$Q_{*i} < S_{*i} \quad * \in s, m, d, r \quad (4)$$

$$I_{si}, I_{mi}, I'_{mi}, I_{di}, I_{ri} \geq 0 \quad (5)$$

其中, C_m 为生产成本; C_h 为库存持有成本; C_t 为运输成本; C_o 为订购成本; C_s 为缺货成本; K 为周期总数; R 为零售商总数量; P 为产品的种类数量; D_{rk}^p 为零售商 r 的缺货量; \bar{Q}_{rk}^p 为零售商 r 的客户需求量; s_{*i} 为各级节点的订货点; Q_{*i} 为各级节点的订货批量; S_{*i} 为各级节点最大库存水平。

4 基于改进免疫遗传算法的多级库存控制算法设计

(1)算法参数设置

作者采用实数编码对抗体进行编码,将种群规模设为100,所求问题中涉及到库存成本最小和服务质量最高两个目标的优化。为方便求解该模型,将两个目标方向转为一致全取最小化^[7]。量化表达式如式(8)和式(9)所示:

$$\text{Min}\left(\frac{C_{total}}{C_{max}}\right) \quad (6)$$

$$\text{Min}(1 - Sat) \quad (7)$$

其中, C_{max} 为估计的供应链库存总成本的最大值。

为了将目标函数值的最优解和个体具有的最大适应度值相统一,其转换方法如下:

$$Fit1(i) = \frac{1}{\text{Min}\left(\frac{C_{total}}{C_{max}}\right)} \quad (8)$$

$$Fit2(i) = \frac{1}{\text{Min}(1 - Sat)} \quad (9)$$

其中, $Fit1(i)$ 为个体以成本为目标的适应度值, $Fit2(i)$ 为个体以服务质量为目标的适应度值。

采用加权法对末代种群进行评价,寻找出最优个体,其适应度值:

$$Fit(i) = k_1 Fit1(i) + k_2 Fit2(i) \quad (10)$$

其中, k_1 和 k_2 为加权系数,本文取 $k_1 = 0.5, k_2 = 0.5$ 。

(2)记忆库设定

一般情况下,将初始抗体种群(N)规模大小的10%~

20%设为记忆库的种群规模,用常量 N_R 表示。初始抗体中适应度值由高到低进行排序,将适应度值最高的前 N_R 个抗体存入到记忆库中,从第一代产生的种群抗体开始,将每一次免疫遗传操作后的种群 N 和记忆库中的种群 N_R 合并成一个新的种群 $N_R + N$,然后按照适应度种群由高到低进行排序,将适应值最大的前 N_R 个抗体与记忆库中的抗体进行比较,若不相同,则将替换记忆库中的抗体不相同者,并保存记忆库;若相同则不进行更新。最后在合并种群中选取适应值最大的前 N 个抗体进行下一次迭代计算。

(3) 抗体遗传操作

① 并列选择操作

文中两个子种群根据各自的优化目标分别进行选择,然后再将所有子种群合并成一个种群,进行交叉和变异、免疫操作,产生新一代优良群体;将该完整群体再分为两个子种群,不断循环以上操作,最终得到一组最优解。

② 交叉过程

现假设 x_1 和 x_2 是两个上一代要进行交叉配对的抗体,交叉操作后产生新的抗体 x_a 和 x_b ,其中:

$$x_1 = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1M}), x_2 = (x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2M}),$$

$$x_a = (x_{a1}, x_{a2}, \dots, x_{aM}), x_b = (x_{b1}, x_{b2}, \dots, x_{bM}),$$

此处中间重组法的交叉过程通过 $x_{aj} = x_{1j} + P_c(x_{2j} - x_{1j}), x_{bj} = x_{2j} + P_c(x_{1j} - x_{2j})$ 进行操作,在这里交叉算子 P_c 的值由作者之前提出的改进过程确定。

③ 变异过程

本文变异算子的设计采用均匀变异法,若父代 x_1 抗体中第 j 位基因的值为 x_{1j} ,其种群中第 j 位基因的平均值为 x_{avg} ,经变异操作后的值为 x_{aj} 。

$$x_{aj} = x_{1j} + P_m(x_{1j} - x_{avg}) \quad (11)$$

其中,变异算子 P_m 的值由作者之前提出的改进过程决定。

(4) 免疫过程

根据 Clark A, Jen-Ming Chen 的信息熵理论,每个抗体中第 j 位的信息熵表示为:

$$H_j(N) = -\sum_{i=1}^N p_{ij} \log_2 p_{ij} \quad (12)$$

其中, $H_j(N)$ 表示 N 个抗体分别在第 j 处基因的信息熵; p_{ij} 表示每一个抗体上 i 基因在第 j 处出现的概率。

那么 N 个抗体信息熵表示为:

$$H(N) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(N) \quad (13)$$

N 个抗体中抗体 i 和抗体 j 的表达式为:

$$A_{ij} = \frac{1}{1+H(2)} (i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, N; i \neq j) \quad (14)$$

抗体的浓度是由抗体亲和度值较高的抗体在所有抗体中所占的比率决定的,因此抗体 i 的浓度 C_i 表示为:

$$C_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N A_{ij}^* \quad (15)$$

其中, $A_{ij}^* = \begin{cases} 1, & A_{ij} \geq \lambda \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$; A_{ij}^* 与抗体 i 结合的亲和度高于 λ 的抗体的总数,其中通常情况下阈值 λ 取值为 $[0.9, 1]$ 。

算法规定免疫选择率为抗体、抗原的亲和力与抗体浓度的比值,抗体 i 的免疫选择率表示为 e_i 。计算过程中将免疫

选择率从高到低排列,免疫选择率较高代表该抗体浓度较低,进行保留;免疫选择率较低表示浓度较高,进行舍弃,从而有效进行浓度调节。免疫选择率的表达式为:

$$e_i = \text{Fit}(i)/C_i \quad (16)$$

5 多级库存优化在家具企业的应用

针对公司各级库存供应链管理的问题,建立供应链多级库存控制策略,以节约库存成本并提高服务水平。本文以 A 公司产品 P1, P2 供应链为背景,建立供应链环境下的多级库存成本模型。该供应链的运作模式为: A 公司将供应商供给的原材料制成成品,通过分销网络将产品销售到顾客手中。

本文通过对该公司现实情况中的多产品、多周期、多目标进行分析,选取该公司具有代表性的包含两个供应商、一个核心制造商、两个分销中心和两个零售商的多级库存系统作为多级库存模型。该系统中每个供应商提供一种原材料,制造商生产两种核心产成品,各原材料与生产成品的比例为 1:1,两类产品在核心制造商差异化加工中心生产。假设零售商 r 对产品 p 的需求服从参数为 $N(\mu, \sigma^2)$ 的正态分布,在模拟过程中,用正态分布随机数生成函数来构造需求模拟器。调用函数为:

$$\bar{Q}_{ck}^p = \text{normcdf}(\mu * \sigma)$$

其中, normcdf 为生成正态分布随机数的调用命令。

给出实例中供应链上节点的参数,由表 1—表 5 所列。

表 1 木材供应商的各项基本数据

类别	G1	G2
单位货品存储成本(元/件·期)	2.1	1.7
第一期初库存量(件)	240	260
日需求期望值	210	210
日需求方差	25	25
最大库存量(件)	3000	3000
单件货品的订购成本(元/件)	14.0	17.0
固定订购成本(元/次)	111.5	114

注: G1 代表供应商 1, G2 代表供应商 2。

表 2 家具制造企业原材料的各项基本数据

类别	Y1	Y2
单位库存持有成本(元/件·期)	2.4	1.9
第一期初库存量(件)	130	75
日需求期望(件)	140	140
日需求方差	25	25
订货提前期(天)	0.5	0.5
固定订购成本(元/次)	114.6	97.7

注: Y1 代表原材料 1, Y2 代表原材料 2。

表 3 家具制造企业成品的各项基本数据

类别	P1	P2
单位存储费用(元/件·期)	1.48	1.20
第一期初库存量(件)	230	190
日需求期望(件)	105	110
日需求方差	12	10
生产量(件/期)	225	240
正常上班单位时间生产费用(元/小时)	12	14
每天正常上班时间(小时)	8	8
每天加班时间限额(小时)	2	2
加班时间的额外成本(元/小时)	4	5
一个订购周期内的时间限额	4	4
每小时生产能力(件/小时)	30	30

注: P1 代表产成品 1, P2 代表产成品 2。

表 4 家具分销中心的各项基本数据

类别	D1		D2	
	P1	P2	P1	P2
单位库存存储费用(元/件·期)	1.24	1.12	1.31	1.17
固定订货费用(元/次)	106.6	105.1	102.4	98.9
日需求期望(件)	120	120	120	120
日需求方差	11	11	11	11
第一期初库存量(件)	76	69	84	78

注: D1 代表第一分销商, D2 代表第二分销商。

表 5 家具零售店的各项基本数据

类别	R1		R2	
	P1	P2	P1	P2
单位库存存储成本(元/件·期)	1.31	1.19	1.41	1.18
日需求期望(件)	110	110	110	110
日需求方差	9	9	9	9
单位缺货成本(元/件·期)	6.26	6.11	5.16	5.73
固定订购成本(元/次)	108.4	110.2	107.1	106.8
第一期初库存量(件)	65	65	70	75

注: R1 代表第一零售商, R2 代表第二零售商。

供应链中估计库存总成本的最大值 $C_{max} = 2.5 \times 10^5$; 在改进的免疫遗传算法中: 最大遗传代数 $Maxgen = 200$; 种群的规模 $NIND = 100$; 选择概率 $GGAP_{初} = 0.65$; 最低和最高交叉概率分别为 $P_{min} = 0.5$, $P_{max} = 0.8$; 相应的变异概率 $P_{max} = \frac{0.7}{PRECI}$, $P_{min} = \frac{0.7}{10 \cdot PRECI}$ 。在普通遗传算法和免疫遗传算法中: $GGAP = 0.9$, $P_c = 0.7$, $P_m = 0.05$, 其他参数与改进免疫遗传算法相同。安全库存因子设置区间为 $k \in [-2, 2]$ 。

分别使用免疫遗传算法以及改进免疫遗传算法对多级库存算法进行设计, 运用 Matlab7.0 软件求解本文所建立的供应链库存优化模型, 成本和服务质量在相应算法下的求解过程曲线如图 2—图 5 所示。图 2 和图 3 是使用普通免疫遗传算法优化的成本曲线和服务质量曲线; 图 4 和图 5 是使用改进的免疫遗传算法求解的成本曲线和服务质量曲线。

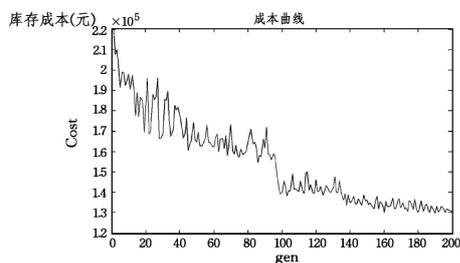


图 2 成本曲线(免疫遗传算法)

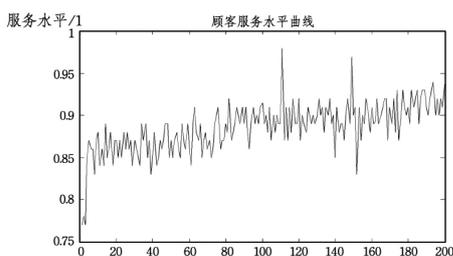


图 3 服务质量曲线(免疫遗传算法)

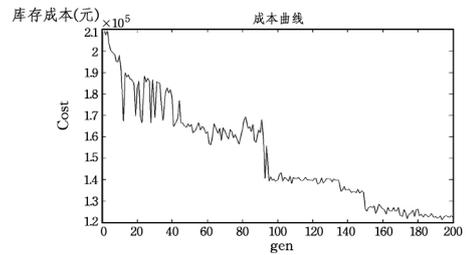


图 4 成本曲线(改进的免疫遗传算法)

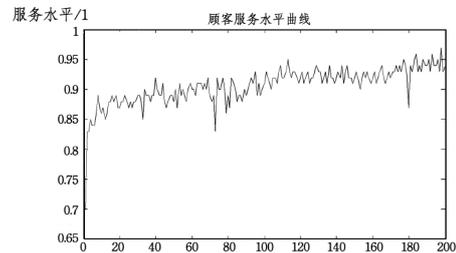


图 5 服务质量曲线(改进的免疫遗传算法)

从图 2—图 5 可以看出, 当遗传迭代到 200 次时, 免疫遗传算法得到的供应链库存总成本为 1.3225×10^5 元, 服务质量为 0.93; 改进的免疫遗传算法求解得到的供应链库存总成本为 1.2823×10^5 元, 服务质量为 0.96, 其库存总成本降低了 27.3%, 服务水平提高了 9%。综上所述, 改进的免疫遗传算法求得的供应链库存成本和服务质量最为合理, 并且其在求解过程的收敛速度和局值收敛方面都有较大的改善, 具有更高的搜索速度和更优的全局搜索能力, 能够提供合理有效的库存控制策略以指导供应链多级库存控制。

结束语 为了研究方便, 本文将供应链上各级节点的提前期设定为固定值, 没有考虑提前期在实际运作过程中的随机性。运输环节仅仅考虑运量对成本的影响, 运输距离并未纳入考虑范畴, 下一步研究需将该问题进行完善。

参考文献

- [1] 颜波, 石平. 多供应链间同级与非同级混合的多级双向跨链库存协作[J]. 华东经济管理, 2013, 27(6): 166-171
- [2] Clark A, Scarf. Optimal Policies for a multi-echelon inventory problem [J]. Management Science, 1960(6): 475-490
- [3] Moinszadeh K, Aggarwal P K. An information based multi-echelon inventory system with emergency orders[J]. Operations. Research, 1997(45): 694-701
- [4] Khouja M. Optimizing. Inventory. Decisions. in. Multi-stage. Multi-customer. Supply Chain [J]. Transportation Research Part. E, 2003(39): 193-208
- [5] Ronald H. 企业物流管理—供应链的规划组织和控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002
- [6] 葛显龙, 辜羽洁, 王伟鑫. 供应链环境下的库存与运输整合优化模型及算法[J]. 系统工程, 2014, 32(1): 26-32
- [7] 黄卫华, 许小勇, 范建坤. 实数编码遗传算法中常用变异算子的 Matlab 实现及应用[J]. 广西轻工业, 2007, 1(1): 77-78