

基于 TOC & M-IRP 的多产品双渠道补货模型

周 健, 朱巧迪, 牛林宁

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对拥有零售商和网络直销渠道并伴有顾客转移的多产品二级供应链, 研究其在需求显著变化的转换期内的补货优化模型. 将基于约束理论的供应链补货系统(TOC-SCRS)运用到上游制造商节点, 下游零售商运用改进后的整数比(M-IRP)策略. 以供应链的补货、库存和缺货成本为优化目标, 考虑顾客满意度和库容量约束, 应用遗传算法比较 M-IRP、整数比(IRP)和传统(s, S)策略, 并进行灵敏度分析. 结果表明 M-IRP 和 IRP 策略下的供应链总成本与(s, S)策略的相对差异为 15.36% 和 11.19%, 同时验证了在不同参数变化情况下该策略的优势.

关键词: 多产品; 双渠道; 顾客转移; 补货; 改进型整数比策略(M-IRP)

中图分类号: F273.1; TP391

文献标志码: A

Replenishment Policy for a Dual-channel Supply Chain Model with Multi-products Based on TOC & M-IRP

ZHOU Jian, ZHU Qiaodi, NIU Linning

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A coordinated replenishment policy is discussed for a two-echelon dual-channel supply chain model with multi-products in dynamic demand conversion periods. The application of TOC-SCRS in manufacturer determines the replenish frequency in manufacturer warehouse. The retail store employs a modified integer-ratio policy to synchronize the replenishment between each node and each product, and increase inventory turnover rate. The objective of this model is to minimize the sum of replenishment cost, inventory cost and the shortage cost, subject to the customer satisfaction and storage capability constraints. Finally, a numerical experiment based on modified GA is presented to compare three strategies with sensitivity analysis. Numerical experiment results show that compared with (s, S) strategy, 15.36% and 9.74% gaps are gained by M-IRP and Integer-

ratio policy.

Key words: multi-product; dual-channel; customer shift; replenishment; modified integer-ratio policy

电子商务的迅猛发展给传统企业提供了多渠道营销平台, 并以其低成本、高效率的优势占领更多的市场份额, 有效帮助企业赢得市场. 然而, 多渠道可能会引起产品需求结构的破坏, 如消费者偏好、渠道间的需求存在交叉替代效应^[1], 使供应链上、下游之间的协作更加复杂. 因此, 建立高效的库存分配和协同补货体系, 从而获得更好的渠道性能, 是解决这些问题的关键性举措.

针对多渠道二级供应链环境下库存分配和补货问题, 近几年来国内外许多学者进行了深入研究. Chiang 等^[2]研究有传统零售商和网络销售渠道的供应链, 应用一对一库存控制策略, 比较单一渠道与双渠道的绩效差异, 并利用数值算例证明在大多数情况下双渠道的灵活性能降低库存成本, 优于单一渠道. Takahashi 等^[3]在此基础上, 额外考虑了生产换模和配送成本, 提出了一种新的库存控制策略. 当库存量少于某个值时补货量为消耗的倍数, 并证明在此模型下该策略优于一对一库存控制策略. Mahar 等^[4]将虚拟池引入双渠道供应链模型中, 提出两种动态分配策略, 持续监控在线需求和库存水平从而掌握实时信息, 并证明其在降低系统总成本上的优势. Chiang^[5]针对生产单一产品并拥有直销渠道和独立零售商的供应商, 研究缺货的产品可用性代替和渠道效率问题, 结果发现集成系统相较于各自独立情况的缺货替代更能满足客户需求. Chen 等^[6]针对价格敏感需求的零售商, 考虑定期检查价格和库存控制问题, 通过动态决策定价和最优补货策略达到最大化利润. 结果表明(s, S)策略较优, 最优价格根据

确定补货策略后的库存水平决定. Huh 等^[7]研究拥有拍卖机制、买方自主定价机制等多样化销售渠道的供应链补货问题,采用(s,S)补货策略,并通过数值实验证明其在该模型中的适用性和最优性.但目前大部分文献都没有同时考虑多产品-多渠道的补货问题,也很少研究上游制造商瓶颈工序的生产换模对供应链各级补货频率的影响.

为填补这个缺口,本文针对多产品双渠道二级供应链模型,将文献[8-9]中的基于约束理论的供应链补货系统(TOC-SCRS)应用到上游制造商节点,将改进后的整数比(M-IRP)策略运用到下游零售商,研究在需求量显著增加的转换期内,考虑顾客转移率的补货模型.以供应链的总体补货成本、库存成本和缺货成本之和为优化目标,考虑顾客满意度和库容量约束,利用改良遗传算法对供应链的补货策略进行优化,通过实验检验策略的合理性.

1 问题描述

以一个多产品双渠道二级供应链为研究对象,如图 1 所示. 制造商生产 i 种产品,面向零售商和网络直销这两种渠道的顾客群体, $d_{i,j}$ 表示顾客在第 j 天对 i 产品的市场总需求, α 为消费者对网络直销渠道的偏好系数. 中央仓库向工厂补货的频率为 $f^{(w)}$,网络渠道的需求 $d_{i,j}^{(d)}$ 直接由中央仓库满足;零售商以补货频率 $f_i^{(r)}$ 从中央仓库补货,补货量为 $q_{i,j}^{(r)}$,因此中央仓库的实际每日需求为 $d_{i,j}^{(w)} = d_{i,j}^{(d)} + q_{i,j}^{(r)}$. 模型允许各节点缺货发生,当中央仓库缺货时,网络渠道的缺货量 $S_{i,j}^{(d)}$ 以 β 的概率转移到零售商,其余顾客需求直接损失,因此零售商的实际每日需求为

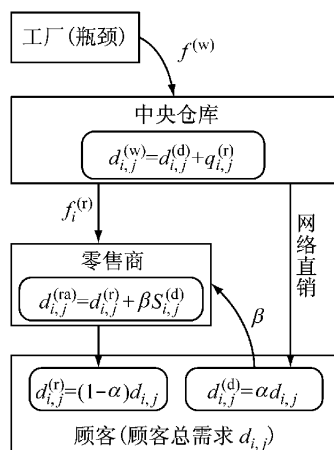


图 1 多产品双渠道二级供应链模型

Fig. 1 A two-echelon dual-channel supply chain model with multi-product

$d_{i,j}^{(ra)} = d_{i,j}^{(r)} + \beta S_{i,j}^{(d)}$, β 即为顾客转移率.

为使问题更加切合实际且便于建模,作如下假设:①每种产品的顾客需求服从正态分布^[10],且独立同分布, $d_{i,j} \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$. ②零售商需求大于网络直销渠道需求, $\alpha < 0.5$,因此令中央仓库缺货时优先供货给零售商,且零售商允许其延期交货;终端客户需求不允许延期发货,缺货直接造成销售损失. ③工厂至中央仓库距离忽略不计,不考虑运输时间,即补货提前期为生产提前期. ④零售商补货能力有限,每种产品每日最多补货八次,即 $f_i^{(r)} \geq 0.125$. ⑤中央仓库和零售商的补货量到达均发生在期初. ⑥零售商库容量有限.

2 模型建立与分析

2.1 上游制造商的 TOC 应用

工厂根据各产品的需求预测进行排产. 基于 TOC-SCRS 原理,供应链需求和工厂瓶颈工位的产能约束确定了中央仓库向工厂的补货频率 $f^{(w)}$,如下所示^[8]:

$$f^{(w)} = \left\lceil \frac{\sum_{i=1}^I s_i \left\lceil \frac{L_i}{w} \right\rceil}{C - \sum_{i=1}^I L_i} \right\rceil \quad (1)$$

式中:符号 $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整; s_i 表示产品 i 的换模时间;产品 i 每日所需产能 $L_i = D_i/p_i$,其中 $D_i = \mu_i + \lambda \sigma_i$, λ 为安全系数,保证产能满足需求波动, p_i 表示各产品的每小时产出; C 表示工厂的每日产能 $C = mw$,其中 m 为瓶颈工位的机器数量, w 为每日的生产小时数.

为缓解牛鞭效应产生的库存过量问题,令中央仓库向工厂的补货量 $q_{i,j}^{(w)}$ 等于在 $f^{(w)}$ 周期内的需求消耗量. 中央仓库补货量的接收时间取决于工厂中产品的生产优先级,可以用库存耗尽的时间^[11]来确定: $R_i = I_{i,j}^{(w)}/D_i$, $I_{i,j}^{(w)}$ 表示中央仓库期末库存. R_i 越小,说明产品 i 越需要优先生产.

基于生产优先序,每个补货周期产品的完工时间 H_i 和中央仓库补货接收量 $r_{i,j}^{(w)}$ 分别由式(2)和(3)^[9]确定,此时 i 为排序后的产品顺序.

$$H_i = \left\lceil \sum_{i=1}^I \frac{\frac{f^{(w)} q_{i,j}^{(w)}}{p_i} + \min \left\{ \left\lceil \frac{f^{(w)} q_{i,j}^{(w)}}{w p_i} \right\rceil, m \right\} s_i}{m w} \right\rceil \quad (2)$$

$$r_{i,j}^{(w)} = \begin{cases} q_{i,j}^{(w)} - (j - H_i + f^{(w)})/f^{(w)}, & \text{mod}((j - H_i + f^{(w)})/f^{(w)}) = 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 下游零售商补货策略

将 TOC 应用于多级供应链的关键在于协调上、下游的补货频率和补货量. 现实中广泛采用的传统补货策略主要分为连续检查策略和定期检查策略^[12]. 虽操作简便,但会出现商品周转率较低、补货或库存费用偏高、需求响应不够灵敏等问题. 近几年涌现的供应商管理库存(VMI)、联合库存管理(JMI)和协同规划、预测与补货(CPFR)等策略,重视供应链节点间的无缝连接,能弥补传统策略的不足,但技术要求高,管理难度大,鲜有企业成功应用.

本模型上游中央仓库的补货频率根据平均每日需求预测值和工厂产能约束确定. 为了协调供应链上、下游之间的补货频率,令下游零售商采用高效且易于操作的整数比策略^[13],同时考虑多产品共同补货. 另外由于中央仓库根据产品优先序供货,因此需要对整数比策略进行改进以适应模型,下文用 M-IRP 表示. 保证上、下游协同补货的变量 K 为纵向协同变量,保证各产品间协同补货的变量 k_i 为横向协同变量,如下所示:

$$F = Kf^{(w)}, \quad K = 1/2, 1/3, \dots \text{ 且 } F \geq 0.125 \quad (4)$$

$$f_i^{(r)} = k_i F, \quad k_i = 1, 2, 3, \dots \text{ 且 } \text{mod}((1/K)/k_i) = 0 \quad (5)$$

式中: F 为中间变量.

零售商根据实际每日需求补货,因此每个补货间隔期期末的补货量 $q_{i,j}^{(r)}$ 即为本期内包括网络直销渠道缺货转移在内的顾客需求量 $d_{i,j}^{(ra)}$, 其中 $q_{i,j}^{(r)}$ 表示整天的补货量. 当 $f^{(w)} \leq 1$ 时,如果 $f_i^{(r)} < 1$, $q_{i,j}^{(r)}$ 为当天多次补货的总补货量,因此对 $f_i^{(r)}$ 向上取整 $[f_i^{(r)}]$; 如果 $f_i^{(r)} \geq 1$,则 $q_{i,j}^{(r)}$ 为原值,可得

$$q_{i,j}^{(r)} = \sum_{b=j-[f_i^{(r)}]+1}^j d_{i,b}^{(ra)}, \quad \text{mod}(j/[f_i^{(r)}]) = 0 \quad (6)$$

当 $f^{(w)} > 1$ 时,如果 $f_i^{(r)} \geq f^{(w)}$,则零售商对各产品的初始补货时间点根据 H_i 排序(见式(7)),保证产品生产完后零售商即刻可补货,既减少中央仓库的库存水平,又防止零售商缺货;如果 $f_i^{(r)} < f^{(w)}$,则在 $f^{(w)}$ 周期内令 H_i 前的补货量根据库存和第二天的需求预测差值来计算,从而缓解零售商补不到货或者其补货导致网络直销渠道缺货的状况,式(8)表示在第 n 个 $f^{(w)}$ 周期内产品 i 完工日前的补货量调整, $I_{i,j}^{(r)}$ 表示零售商仓库的期末库存.

$$q_{i,j}^{(r)} = \sum_{b=j-f_i^{(r)}+f^{(w)}}^{j-1+f^{(w)}} d_{i,b}^{(ra)}, \quad \text{mod}((j-H_i+f^{(w)})/f_i^{(r)}) = 0 \quad (7)$$

$$q_{i,j}^{(r)} = \sum_{j=(n-1)f^{(w)}+1}^{(n-1)f^{(w)}+H_i-1} \max(0, (d_{i,j}^{(ra)} - I_{i,j}^{(r)})), \quad H_i > 1 \quad (8)$$

2.3 需求变化的模型扩展

本文针对需求变化转换期内的供应链模型进行扩展,假设第 t 天开始需求显著增大,使工厂产能无法满足需求未增加时换模频率下的产量要求,需要重新计算合理的中央仓库补货频率. 以第 t 天为参照日,令 t 天前中央仓库的补货频率为 $f^{(w)}$. 当需求显著增加时根据式(1),得 $(t-1)$ 天之后相应延长的补货频率为 $f^{(w)'}$,相应 $(t-1)$ 天之后的零售商补货频率为 $f_i^{(r)'}$,同时横向协同变量则相应变为 k_i' .

但是,第 t 天的补货量仍然是通过增大前的需求量和 $f^{(w)}$ 求得,因此转换期内会有大量的缺货发生. 本质上, $(t-1)$ 天的补货量 $q_{i,t-1}^{(w)}$ 决定了 $(t+f^{(w)'}) \sim (t+2f^{(w)}-1)$ 是否会缺货. 因此令中央仓库 $(t-1)$ 天的补货量 $q_{i,t-1}^{(w)}$ 为决策变量,同理也令零售商处的 $q_{i,t-1}^{(r)}$ 为决策变量,使模型在缺货成本、库存成本和补货成本之间寻找均衡点,保证供应链的总成本最小化.

2.4 目标函数

根据以上分析,本文模型共有五个决策变量,分别为 $K, k_i, k_i', q_{i,t-1}^{(w)}$ 和 $q_{i,t-1}^{(r)}$. 整个供应链的总成本由以下三方面组成:中央仓库和零售商的补货成本 $T^{(R)}$ 、库存成本 $T^{(H)}$,以及包括中央仓库的网络直销渠道缺货损失、延期惩罚成本和零售商顾客损失这三部分的缺货成本 $T^{(S)}$,如式(9)~(11)所示.

$$T^{(R)} = J \left(A^{(w)} + \sum_{i=1}^I \frac{a_i^{(w)}}{f^{(w)}} \right) + J \left(\frac{A^{(r)}}{Kf^{(w)}} + \sum_{i=1}^I \frac{a_i^{(r)}}{k_i K f^{(w)}} \right) \quad (9)$$

$$T^{(H)} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (h_i^{(w)} V_{i,j}^{(w)}) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (h_i^{(r)} V_{i,j}^{(r)}) \quad (10)$$

$$T^{(S)} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\xi_i^{(p)} (S_{i,j}^{(w)} - S_{i,j}^{(d)})) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [\xi_i (S_{i,j}^{(r)} + (1-\beta)S_{i,j}^{(d)})] \quad (11)$$

式中: $A^{(w)}$ 和 $A^{(r)}$ 代表中央仓库和零售商的单位补货固定成本,每发生一次补货就产生一次固定成本; $a_i^{(w)}$ 和 $a_i^{(r)}$ 表示产品 i 相应的单位补货变动成本,每增加一种产品就产生一次变动成本; $h_i^{(w)}$ 和 $h_i^{(r)}$ 表示产品 i 在中央仓库和零售商的单位库存成本; $V_{i,j}^{(w)}$ 和 $V_{i,j}^{(r)}$ 表示中央仓库和零售商的每日库存均值,当

$f_i^{(r)} < 1$ 时, $V_{i,j}^{(r)} = \frac{1}{2} (I_{i,j}^{(r)} + q_{i,j}^{(r)} f_i^{(r)} + I_{i,j}^{(r)})$; $\xi_i^{(p)}$ 为中央仓库无法及时供货给零售商的单位延期惩罚成本, ξ_i 为网络直销缺货和零售商缺货时的单位缺货损失。

最终得目标函数(12), $T^{(TC)}$ 表示供应链的总成本, 式(13)~(20)为约束条件。式(13)和(14)为需求满意度约束, 代表顾客对供应链及时供货的满意程度, 考虑以下两方面内容: 中央仓库向零售商补货时针对延期交货的需求满意度, l_1 为相应的延期交货率; 中央仓库和零售商的顾客需求满意度, l_2 为相应的顾客损失比例。式(15)表示零售商的最大库存需满足库容量约束, $r_{i,j}^{(r)}$ 为零售商补货接收量, Q 为零售商最大库容。式(16)~(18)表示零售商补货频率约束, N 为大于1的正整数; 式(19)和(20)分别表示中央仓库和零售商第 $(t-1)$ 天的补货量上下限约束。

$$\min T^{(TC)} = T^{(R)} + T^{(H)} + T^{(S)} \quad (12)$$

s. t.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\frac{S_{i,j}^{(r)} + (1-\beta)S_{i,j}^{(d)}}{d_{i,j}} \right) / (IJ) < (1-l_1) \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\frac{S_{i,j}^{(w)} - S_{i,j}^{(d)}}{d_{i,j}^{(r)}} \right) / (IJ) < (1-l_2) \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I (I_{i,j}^{(r)} + r_{i,j}^{(r)}) \leq Q, \quad \forall j \geq 1 \quad (15)$$

$$K = 1/N, \quad N > 1 \quad (16)$$

$$K f^{(w)} > 0.125 \quad (17)$$

$$\text{mod}((1/K)/k_i) = 0, \quad k_i \in N, \forall i \quad (18)$$

$$\sum_{m=t-f^{(w)}}^{t-1} d_{i,m} \leq q_{i,t-1}^{(w)} \leq \sum_{m=t}^{t+f^{(w)}} d_{i,m}, \quad \forall i \quad (19)$$

$$\sum_{m=t-f_i^{(r)}}^{t-1} d_{i,m}^{(ra)} \leq q_{i,t-1}^{(r)} \leq \sum_{m=t}^{t+f_i^{(r)}} d_{i,m}^{(ra)}, \quad \forall i \quad (20)$$

3 模型求解

本文以整个供应链的总成本为目标函数, 应用改良遗传算法对此问题进行优化求解, 采用 Visual Studio C# 编程实现。

3.1 准备工作

(1) 染色体编码。实数编码与二进制编码相比, 在数值优化方面有更高的精度和效率, 且搜索范围大。因此采用实数编码, 染色体共分为五段, 如图2所示。一条染色体代表一个供应链整体补货策略, 编码上下限为约束(16)~(20)的上下界。

(2) 适应度 f 。用目标函数(12)作为适应度函

K	k_1	k_2	\dots	k_i	k'_1	k'_2	\dots	k'_i	$q_{1(t-1)}^{(r)}$	$q_{2(t-1)}^{(r)}$	\dots	$q_{i(t-1)}^{(r)}$	$q_{1(t-1)}^{(w)}$	$q_{2(t-1)}^{(w)}$	\dots	$q_{i(t-1)}^{(w)}$
$4 \times i + 1$																

图2 染色体

Fig.2 Chromosome

数, 即 $f = T^{(TC)}$ 。

(3) 初始化参数。设定种群规模 100, 交叉率 0.9, 变异率 0.01。

(4) 终止条件。最大迭代次数 100。

3.2 初始种群的产生

根据五个决策变量的可行域, 随机生成一个个个体, 并以约束(13)~(15)检验顾客满意度和零售商的库容量约束。若顾客满意度条件不满足, 则重新产生新个体; 若库容量约束不满足, 则零售商的每日补货频率加 1。直到产生符合满意度约束的种群规模, 形成初始种群。

3.3 选择

采取基于适应度值的“轮盘赌”选择算子。为了防止种群中弱势群体过早被淘汰从而影响后代的多样性, 采用与最差适应度的数值距离成正比的概率选择算子, 同时淘汰末尾算子构成下一代种群, 保证了一定的随机性和进化度。本文算法中将种群个体

按照适应度值大小降序排序, 设序号为 $1, 2, \dots, N$, 则排序个体 i 被选中的概率

$$P(x_i) = \frac{f_{\max} - f(x_i)}{\sum_{i=1}^N (f_{\max} - f(x_i))}$$

3.4 交叉

由于决策变量中 $q_{i,t-1}^{(r)}$ 的取值范围根据 k'_i 来确定, 因此需要对算法的交叉做适当调整。模型采用单点交叉的方式, 同时将 k'_i 和 $q_{i,t-1}^{(r)}$ 看作一个整体, 当 k'_i 交叉时, 相应的 $q_{i,t-1}^{(r)}$ 同时进行交叉; 反之亦然。因此, 随机产生二进制染色体 O , 其中 $q_{i,t-1}^{(r)}$ 相对应的基因值为空。将双亲的基因在染色体 O 基因值为 1 的对应位置互换。现有个体 X 和 Y , 根据交叉规则产生新个体 X' 和 Y' , 如图3所示。

3.5 变异

本文采用多点变异方式, 随机产生二进制染色体 O , 在基因值为 1 的位置上突变, 从而维持种群多

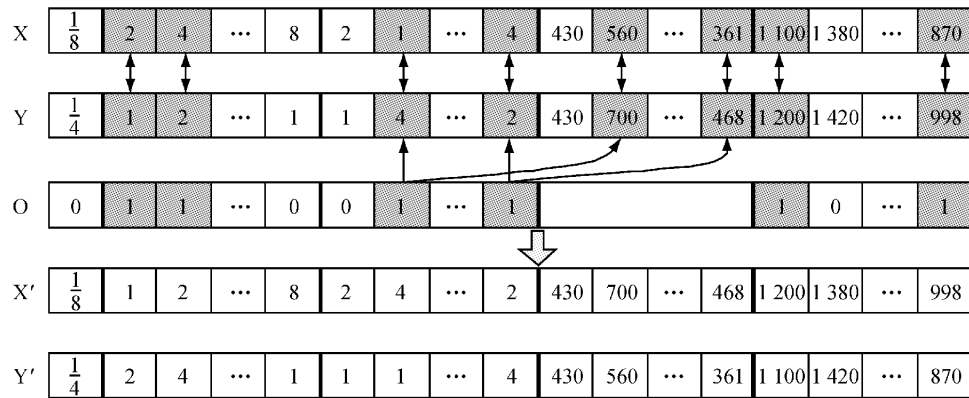


图3 染色体交叉图

Fig.3 Crossover

样性. 考虑到 $q_{i,t-1}^{(r)}$ 和 k_i' 的相关性, 当 k_i' 以一定变异率突变时相应的 $q_{i,t-1}^{(r)}$ 改变其取值范围, 产生不同值; 当 k_i' 不发生变异时, 再给定 $q_{i,t-1}^{(r)}$ 一个变异

率, 使其以一定的概率突变, 取值范围保持不变. 这种方式确保了 k_i' 与 $q_{i,t-1}^{(r)}$ 突变的同步性与随机性. 染色体变异过程如图 4 所示.

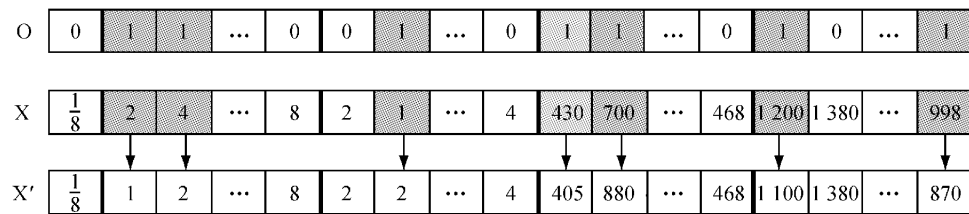


图4 染色体变异图

Fig.4 Mutation

4 实例分析

本实验数据来源于文献[9], 以一个简化后的工厂实例为对象, 进行数值验证与分析. 工厂生产四种产品, 瓶颈工位只有一台机器, 一天 24 小时运转; 第 4 天开始需求显著增大, 即 $t=4$; 产品的 σ_i 均为 20, λ 取 2. 与产品相关的其余数据如表 1 所示.

表1 产品需求和生产相关数据

Tab.1 Demand and production data of the products

生产相关数据	产品 i			
	A	B	C	D
换模时间 s_i/h	1.0	1.5	0.5	1.0
每小时产出 p_i	100	120	200	80
t 天前日需求均值 μ_i	400	720	600	480
$(t-1)$ 天后日需求均值 μ_i'	500	780	800	560
缺货百分比	$l_1=l_2=10\%$			

由式(1)得, t 天前的中央仓库补货频率 $f^{(w)}$ 为 1, 而 $(t-1)$ 天后的日需求显著增大, 再次根据式(1)求得 $f^{(w)'}=3$. 因此考虑转换期为九天的周期内供应链的补货决策数值分析, 并根据库存耗尽时间安排生产优先序为 $D \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow B$.

4.1 三种补货策略比较

为了验证 M-IRP 策略在 TOC 环境下的适用性, 选用整数比 (IRP) 策略, 以及在现实系统中尤其在零售行业被广泛采用的 (s, S) 策略^[14] 做对比, 比较三个策略的优劣, 如表 2 所示. 表 3 为 M-IRP 与 IRP 策略的产品补货频率比较. 其中所有产品的缺货损失和延期惩罚成本相同, 基本参数值为: $\alpha=0.2, \beta=0.5, A^{(w)}=A^{(r)}=100, a^{(w)}=a^{(r)}=25, h^{(w)}=0.5, h^{(r)}=1, \xi^{(p)}=3, \xi=9$.

由表 2 和 3 可以发现, M-IRP 策略的总成本最小, IRP 策略次之, (s, S) 策略最大, 前两者同后者的总成本相对差值分别为 15.36% 和 11.19%. M-IRP 策略不仅在总成本上占有绝对的优势, 而且有效避免了缺货的发生, 提高了顾客满意度, 证明了其在此类供应链中的有效性.

究其原因, M-IRP 和 IRP 策略由于补货频率较小, 补货成本大于 (s, S) 策略, 但由此降低的零售商库存成本足以抵消在补货成本上的劣势. M-IRP 策略同时协调了供应链上、下游间和各产品间的补货, 因此补货成本大大降低. 而 (s, S) 策略由于受到库容量约束的限制, 零售商顾客的缺货现象较为严重. 零

售商优先补货导致延期惩罚出现的概率基本为零. M-IRP 策略在补货频率小于 1 时,通过顺延部分补货量至中央仓库完工时间后,所以相较于未改进的 IRP 策略缺货更不易发生.

表 2 不同零售商补货策略的供应链绩效比较
Tab.2 Performance comparison of three different strategies

供应链各项成本	补货策略		
	M-IRP	IRP	(s,S)
网络缺货费用	18	342	0
延期惩罚成本	0	0	0
零售商缺货费用	27	36	3 141
供应链缺货总成本	45	378	3 141
中央仓库补货成本	1 400	1 400	1 400
零售商补货成本	4 402	5 100	1 800
供应链补货总成本	5 802	6 500	3 200
中央仓库库存成本	26 179	27 145	28 541
零售商库存成本	5 899	5 771	9 925
供应链库存总成本	32 078	32 916	38 466
供应链总成本	37 925	39 794	44 807
总成本相对差异/%	15.36	11.19	—

注:总成本相对差异为 M-IRP 和 IRP 策略相对于 (s,S) 策略所得出的供应链总成本比值.

表 3 M-IRP 与 IRP 策略的产品补货频率比较
Tab.3 Replenishment frequency comparison between M-IRP and IRP

产品 i	M-IRP 策略		IRP 策略	
	$f_i^{(r)}$	$f_i^{(r)'}$	$f_i^{(r)}$	$f_i^{(r)'}$
D	1/2	3/8	1/3	1/3
C	1/2	3/8	1/5	1/3
B	1/2	3/8	1/3	1/3
A	1/2	3/8	1/5	1/3

4.2 参数灵敏度分析

为了验证以上三个策略在不同情况下的绩效,同时识别关键参数以及参数间的比值关系对模型优化目标的影响,对模型进行灵敏度分析.其中, $a^{(r)}$, $h^{(w)}$, $h^{(r)}$, $A^{(r)}$, $\xi^{(p)}$ 和 ξ 为供应链相关成本参数,归为内部参数; α 和 β 为顾客需求相关的不确定因素,归

为外部参数.

4.2.1 内部参数灵敏度分析

分别改变 $A^{(r)}/a^{(r)}$, $h^{(r)}/h^{(w)}$, $a^{(r)}/h^{(r)}$ 和 $\xi/\xi^{(p)}$ 的值,研究这些参数比值变化对各策略的影响.每种情况运行 10 次,求出均值,结果如图 5 所示.研究表明:① 随着 $A^{(r)}/a^{(r)}$ 比值的增加,三种补货策略的总成本均呈上升趋势,IRP 与 (s,S) 策略之间的差异逐渐缩小,而 M-IRP 策略仍具有明显的成本优势. $A^{(r)}/a^{(r)}$ 比值的增大导致补货固定成本产生的影响显著增加,因此 IRP 策略逐渐失去优势,进一步证实了各产品协同补货的 M-IRP 策略在此类环境下的优势.② 随着 $h^{(r)}/h^{(w)}$ 变大, (s,S) 策略下的总成本相对于另两个策略呈更明显的上升趋势,比值越大,后两者的成本优势越明显.这是因为当零售商单位库存成本显著大于中央仓库时,以较高零售商库存满足顾客需求的 (s,S) 策略总成本显著增大,而后两者按需多频次补货的方式则能有效缓解由此带来的影响.③ 相较于前两个参数,总成本对 $a^{(r)}/h^{(r)}$ 比值变化的敏感性不大,随着比值的增大,三个策略下的总成本均呈缓慢的增长趋势,但 M-IRP 和 IRP 与 (s,S) 策略之间的差距逐渐缩小.变动补货成本所占比例的大幅增加虽使后两者的最优补货频率减小,但仍大于 (s,S) 策略的频率,使得总成本优势降低.④ 随着 $\xi/\xi^{(p)}$ 比例的增大, M-IRP 和 IRP 策略下总成本无显著影响,而 (s,S) 策略下的总成本呈明显的上升趋势.这是因为后者库容量受限,导致零售商处缺货量较大,而 M-IRP 策略下的供应链缺货情况不多,对总成本的影响基本可以忽略.

4.2.2 外部参数灵敏度分析

改变 α 和 β 任意一个参数,其他参数保持不变,研究这两个参数的变化对各策略的影响.每种情况下运行 10 次,求出均值,结果如图 6 所示.研究表明:① 随着 α 的增加,零售商顾客需求降低,而模型中令零售商补货优先,导致网络直销渠道缺货量增

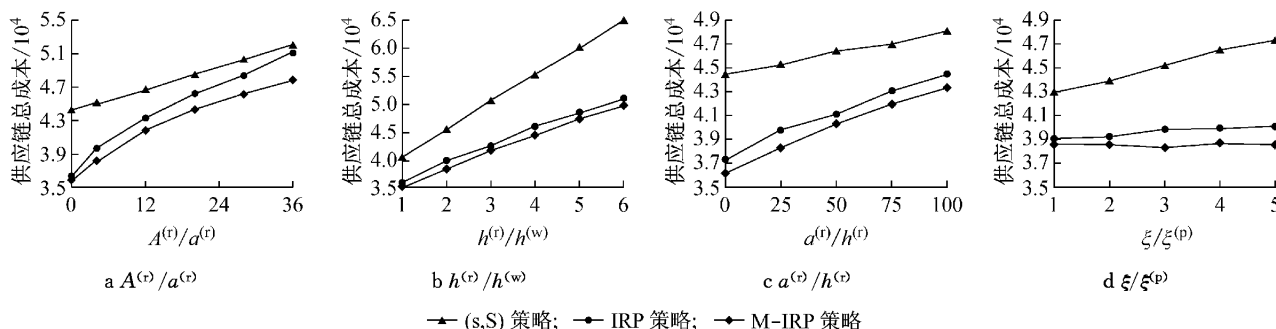


图 5 内部参数比值变化下补货策略绩效比较

Fig.5 Performance comparison of replenishment strategies with different inter parameters

大,因此三个策略的总成本均呈下降趋势。其中,由于顾客满意度和库容量的约束,导致 $\alpha=0.1$ 时,(s,S)策略下的补货策略无可行解。零售商多频次补货的优势随着网络需求比例的增加而逐渐降低,因此三个策略的总成本差异也逐渐缩小,但 M-IRP 策略始终保持优势状态。从整个供应链角度出发,采取适当措施提高顾客转移到网络直销渠道购买产品的意愿,是减少成本的有效方法。②随着 β 的变化,三种策略下的总成本无明显改变,即转移率 β 和总成本之间无显著相关性。导致这一结果的原因是, β 的增加使中央仓库的库存量转移到零售商处,增加了库存成本,从而减少中央仓库网络直销渠道的缺货情况。根据图 7 可以发现,(s,S)策略由于库容量约束只在零售商处存在大量缺货,因此 β 的改变基本不会对其造成影响;而另外两种尤其是 IRP 策略,零售商处的缺货量随着 β 的增加明显减少。

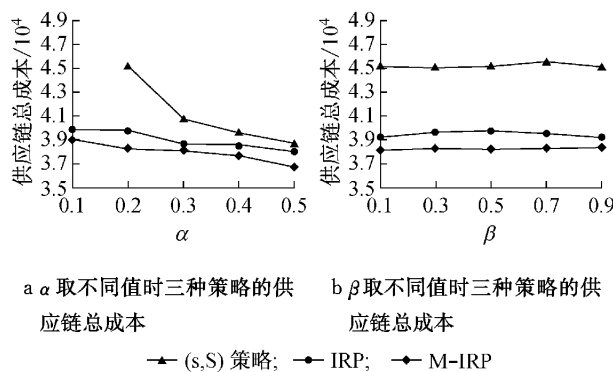
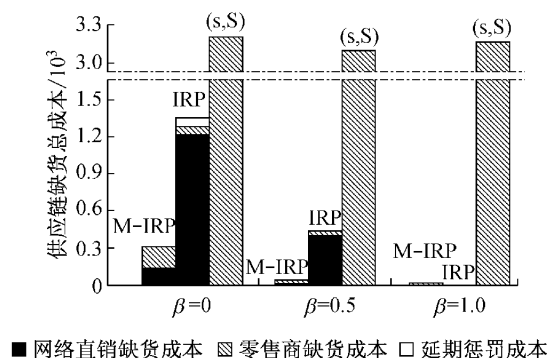


图 6 外部参数变化下补货策略绩效比较

Fig.6 Performance comparison of replenishment strategies with different external parameters

图 7 不同 β 值时三种策略的缺货情况Fig.7 The shortage of three strategies with different β

5 结语

本文以双渠道二级供应链为研究对象,考虑需求显著变化的特殊转换周期内,存在顾客转移情况

的多产品协同补货优化问题。以供应链总体的补货成本、库存成本和缺货成本总和为优化目标,同时考虑了顾客满意度和零售商库容量的约束。根据模型特征,将 TOC-SCRS 应用于上游制造商节点,并在下游零售商处提出一种改进后的整数比策略 M-IRP,从而协同供应链上、下游和产品间补货频率,同时降低各节点缺货的发生。

利用改良的遗传算法对 M-IRP,IRP 和传统(s,S)策略下的供应链总成本进行比较,并对关键参数进行灵敏度分析。数值结果表明 M-IRP 和 IRP 策略同(s,S)策略之间的相对差异分别为 15.36% 和 11.19%,同时也证明了在不同参数变化情况下 M-IRP 策略的绩效优于后两者,且有效缓解了缺货的发生,提高了顾客满意度,同时降低了供应链的总成本。

参考文献:

- [1] 赵礼强. B2C 模式下多渠道价格与库存策略研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
ZHAO Liqiang. Research on multi-channel price and inventory strategy under B2C E-commerce [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [2] Chiang W K, Monahan G E. Managing inventories in a two-echelon dual-channel supply chain [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 162(2): 325.
- [3] Takahashi K, Aoi T, Hirotsu D, et al. Inventory control in a two-echelon dual-channel supply chain with setup of production and delivery [J]. International Journal of Production Economics, 2011, 133(1): 403.
- [4] Mahar S, Bretthauer K M, Venkataramanan M A. The value of virtual pooling in dual sales channel supply chains [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 192(2): 561.
- [5] Chiang W K. Product availability in competitive and cooperative dual-channel distribution with stock-out based substitution [J]. European Journal of Operational Research, 2010, 200(1): 111.
- [6] Chen Y F, Ray S, Song Y. Optimal pricing and inventory control policy in periodic-review systems with fixed ordering cost and lost sales [J]. Naval Research Logistics (NRL), 2006, 53(2): 117.
- [7] Huh W T, Janakiraman G. Inventory management with auctions and other sales channels; optimality of (s, S) policies [J]. Management Science, 2008, 54(1): 139.
- [8] Wu H H, Chen C P, Tsai C H, et al. A study of an enhanced simulation model for TOC supply chain replenishment system under capacity constraint [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(9): 6435.
- [9] Wu H H, Huang H H, Jen W T. A study of the elongated replenishment frequency of TOC supply chain replenishment systems in plants [J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(19): 5567.

- [10] 李怡娜, 徐学军. 双分销渠道下短生命周期产品供应链转运策略[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1): 155.
LI Yina, XU Xuejun. Supply chain transshipment strategy for short life-cycle product under dual-channel [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 155.
- [11] Fogarty D W, Blackstone J H, Hoffmann T R. Production & inventory management [M]. Cincinnati: South-Western Publishing Company, 1991.
- [12] Silver E A, Pyke D F, Peterson R. Inventory management and production planning and scheduling [M]. New York: Wiley, 1998.
- [13] Yao M J, Chiou C C. On a replenishment coordination model in an integrated supply chain with one vendor and multiple buyers [J]. European Journal of Operational Research, 2004, 159(2): 406.
- [14] 裘民民, 赵晓波, 王建才. 基于(s, S)库存策略的分销系统最优分配问题[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(5): 749.
QIU Minmin, ZHAO Xiaobo, WANG Jiancai. Optimal allocation of a distribution system with the (s, S) inventory policy [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2006, 46(5): 749.

(上接第 1324 页)

质软土时的位移效应, 即碎石层抑制静压管桩施工引起的位移场向外扩展。

(3) 碎石层刚度大、强度高, 静压管桩施工至该区域时, 桩侧阻力和桩端阻力大大提高, 管桩的承载力也显著提高。软土地基下卧碎石层对提高管桩承载力和抑制管桩挤土引起的位移效应具有非常重要的意义。

参考文献:

- [1] 龚晓南, 李向红. 静力压桩挤土效应中的若干力学问题[J]. 工程力学, 2000, 17(4): 7.
GONG Xiaonan, LI Xianghong. Several mechanical problems in compacting effects of static piling in soft clay ground [J]. Engineering Mechanics, 2001, 17(4): 7.
- [2] 张明义. 静力压入桩的研究与应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.
ZHANG Mingyi. Research and application of jacked pile [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2004.
- [3] 周火垚, 施建勇. 饱和软黏土中足尺静压桩挤土效应试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3291.
ZHOU Huoyao, SHI Jianyong. Test research on soil compacting effect of full scale jacked-in pile in saturated soft clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3291.
- [4] 鹿群, 龚晓南, 崔武文. 静压单桩挤土位移的有限元分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2426.
LU Qun, GONG Xiaonan, CUI Wuwen. Finite element analysis of compacting displacements of single jacked pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2426.
- [5] 雷华阳, 李肖, 陆培毅, 等. 管桩挤土效应的现场试验和数值模拟[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1006.
LEI Huayang, LI Xiao, LU Peiyi, et al. Field test and numerical simulation of squeezing effect of pipe pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1006.
- [6] Cao L F, Teh C I, Chang M F. Analysis of undrained cavity expansion in elasto-plastic soils with non-linear elasticity [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26(1): 25.
- [7] 李镜培, 李雨浓, 张述涛. 成层地基中静压单桩挤土效应试验[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(6): 824.
LI Jingpei, LI Yunong, ZHANG Shutao. Experimental analysis of compaction effect of single pile jacked in layered ground [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(6): 824.
- [8] 张明义, 邓安福, 干腾君. 静力压桩数值模拟的位移贯入法[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 113.
ZHANG Mingyi, DENG Anfu, GAN Tengjun. Displacement penetration method used for numerical simulation to jacked pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 113.
- [9] 罗战友, 夏建中, 龚晓南, 等. 压桩过程中静压桩挤土位移的动态模拟和实测对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1709.
LUO Zhanyou, XIA Jianzhong, GONG Xiaonan, et al. Comparative study of dynamic simulation for compacting displacement of jacked pile and in-situ test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1709.