

适应动态需求的供应链多级库存系统仿真

周建频¹, 周小番²

(1. 集美大学航海学院, 福建 厦门 361021; 2. 莫纳什大学信息技术学院, 澳大利亚 维多利亚 3145)

[摘要] 针对需求的动态不确定性和供应链多级库存管理的复杂性, 将适应性需求预测、预测误差追踪、改进的散列搜索算法与系统仿真相结合, 提出启发追踪仿真优化方法, 可以实现供应链多级库存系统决策的协同优化, 并应用 Simulink 工具软件构建供应链多级库存决策系统的仿真优化模型。在不同需求波动模式下进行仿真测试, 实验结果显示, 该方法有较好地绩效表现, 能够为供应链多级库存系统决策提供参考。

[关键词] 供应链; 需求预测; 多级库存; 启发式算法; 系统仿真

[中图分类号] TP 391.9; F 272

Simulation Approach for a Supply Chain Multi-Echelon Inventory System Adaptable to Dynamic Demand

ZHOU Jianpin¹, ZHOU Xiaofan²

(1. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Information Technology Faculty, Monash University, Victoria 3145, Australia)

Abstract: With an aim at the dynamic uncertainty of demand and the complexity of multi-echelon inventory management in a supply chain, and by combining demand forecasting, forecast error tracking, improved scatter search algorithm and system simulation, a heuristic tracking simulation-optimization approach is proposed to achieve the collaborative optimization of the multi-echelon inventory system, and the simulation optimization model of a multi-echelon inventory decision-making system for supply chain is constructed by using Simulink tool software. Through simulation tests under different demand fluctuation modes and compared with the existing simulation optimization methods, the experimental results show that the proposed method has achieved better performance, and can provide an effective analysis reference for the decision-making of supply chain multi-echelon inventory system.

Keywords: supply chain; demand forecasting; multi-echelon inventory; heuristic algorithm; system simulation

0 引言

对于复杂供应链多级库存管理决策问题, 各级库存控制节点的协同决策常是实现动态供需匹配的关键。为应对需求的动态多变性和牛鞭效应等现象, 供应链中各节点需要进行库存补货与控制策略的协调, 各节点策略的效果取决于其在供应链中的位置以及其他节点的决策^[1], 因此这是

[收稿日期] 2020-11-11

[基金项目] 福建省自然科学基金项目(2017J01797)

[作者简介] 周建频(1968—), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事人工智能与供应链系统仿真研究。

一个复杂系统决策问题。如文献[2]以啤酒游戏为例,运用系统动力学方法仿真分析了多级供应链库存系统的动态复杂性;文献[3]应用启发式改进蚁群算法构建了一个三级供应链系统库存和配送联合优化模型;文献[4]应用系统动力学机制,提出一种评估复杂供应链网络库存状态及牛鞭效应的方法。

由于供应链环境多阶段决策模型的复杂不确定性,应用解析方法往往难以解决,而随机仿真优化方法是一个较好的求解途径。如文献[5]提出了一种基于仿真的供应链分销库存系统优化框架;文献[6]提出一个将设施布局、安全库存布置和交付策略相集成的供应链决策设计模型。将仿真与启发式算法相结合通常是有效的,如文献[7]开发了一种仿真优化方法来优化多级分销网络的库存策略,比较了嵌套对分搜索和新型散列搜索(scatter search)元启发式方法的性能表现。

为应对需求的动态性,文献[8]应用 Simulink 开发了供应链仿真库,通过对供应链进行模块化设计,建立需求预测和库存控制策略之间的联系,提出了一种追踪需求变化状态的供应链仿真模式,其库存控制策略上采用定点补货法,各决策节点根据对需求预测误差的度量动态决定其安全库存及再订货点,但此方法只应用于供应链的局部环节,并且直接由需求预测误差追踪结果确定其库存控制策略,缺少对更优库存策略的系统化搜索和多级决策的协调能力。

本文将追踪需求动态变化状态与多级库存启发式优化方法相结合,针对供应链多级库存控制问题提出一种启发追踪优化方法。此方法兼顾需求环境动态追踪、局部搜索能力和全局协同优化能力,应用需求动态追踪预测、组合优化和局部搜索等启发式算法,通过供应链仿真,优化多级库存控制决策。

1 供应链多级库存系统建模

1.1 供应链多级库存系统目标函数

设 n 为供应链网络中节点总数量, n_r 为零售商节点数量; D_{it} 为节点 i 在时期 t 的市场需求量; P_i 为在节点 i 的单位产品销售价格; H_i 为节点 i 的单位库存持有成本; I_{it} 为节点 i 在时期 t 的库存数量; w_i 为节点 i 的单位在途库存成本; W_{it} 为节点 i 在时期 t 的在途库存数量; k_i 为各节点在时期 t 的订货次数之和; f_i 为节点 i 订货的固定成本; O_i 为节点 i 与订货数量相关的单位可变成本; O_{it} 为节点 i 在时期 t 的订货数量。

假设只考虑一种产品,供应链在时期 t 的总收入为: $R_t = \sum_{i=1}^{n_r} \min(I_{it}, D_{it}) P_i$; 供应链在时期 t 的总库存持有成本 $C_{ht} = \sum_{i=1}^n H_i I_{it}$; 总库存成本 $C_{ut} = \sum_{i=1}^n w_i W_{it}$; 总订货成本 $C_{ot} = \sum_{i=1}^n (O_i Q_{it} + k_i f_i)$ 。

则供应链在 T 个时期的总利润 P_T 为: $P_T = \sum_{t=1}^T R_t - \sum_{t=1}^T (C_{ht} + C_{ut} + C_{ot})$ 。

1.2 供应链多级库存仿真模型

设所研究的供应链网络共包括 10 个角色节点,分别是 5 个零售商、2 个分销商、1 个制造商和 2 个供应商,且每个零售商对应一个市场需求区域(Markets)。多级库存系统仿真模型对应的供应链网络结构如图 1 所示。

按照图 1 的供应链网络结构,采用 Simulink 仿真软件设计多级库存策略仿真模型。

仿真模型采用分层模块化设计,一级模块是顶层结构,其模块内部可包括二级和三级等模块结构,如各零售商模块,包括需求预测和库存控制两个二级模块结构,预测模块生成的预测结果被输入到库存控制系统。各市场区域(markets)产生需求数据,零售商、分销商和制造商分别根据各自的补货策略向相邻的上游阶段发出补货订单,各节点的补货策略是模型的决策变量。

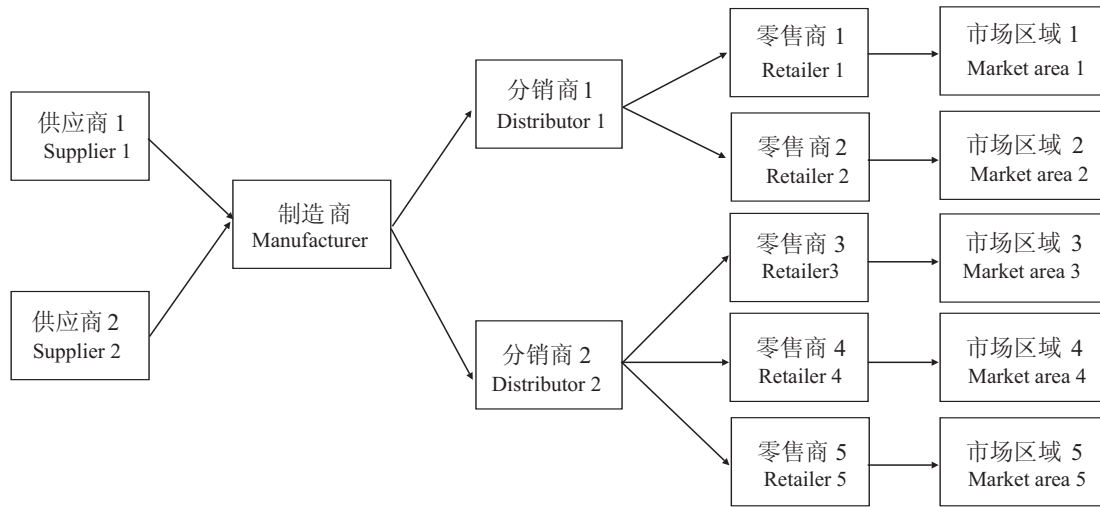


图 1 供应链多级库存系统网络结构

Fig.1 Supply chain network structure for multi-echelon inventory system

2 多级库存系统的适应性优化策略

2.1 需求预测与安全库存

需求预测是进行供应链计划决策和实现供需匹配的基础,采用时间序列预测法可较好地追踪需求的短期变化。指数平滑法是一种常用的时间序列需求预测方法,高阶平滑可以使预测结果更好地拟合历史数据,但可能会出现过度拟合,而低阶平滑可较好地追踪大的变化趋势,但对于短期变化预测不够精确。本文采用简单指数平滑方法,并利用预测误差的追踪信号变化调整平滑指数和预测方法。设 F_t 为时期 t 的需求预测, D_t 为时期 t 的实际需求, α 为平滑指数,则时期 $t+1$ 的需求预测为 $F_{t+1} = \alpha D_t + (1 - \alpha) F_t$ 。设时期 t 的预测误差为 $E_t = F_t - D_t$,则预测的平均绝对偏差为 $MAD_n = \sum_{i=1}^n |E_i|/n$ 。

观测需求模式变化的追踪信号为: $TS_t = \sum_{i=1}^n E_i / MAD_t$ 。

如果 TS_t 的值在 ± 6 的范围之外,说明预测出现了偏离,需求很可能被低估或高估了^[10],需要调整平滑指数或预测方法。

库存控制策略需要对预测误差的不确定性进行度量,以建立预测系统和库存控制之间的联系,估算所需的安全库存。设在时期 t 的预测均方误差 $MSE_t = \sum_{i=1}^n (D_i - F_i)^2/n$,若 $\sigma_1 = \sqrt{MSE_{t+1}}$,补货提前期为 L ,则补货提前期内的需求预测误差标准差为^[8]: $\sigma_L = \sigma_1 \sqrt{L} \sqrt{1 + \alpha(L-1) + \alpha^2(L-1)(2L-1)/6}$ 。

假设预测误差服从 iid (独立同分布的),期望的周期服务水平为 CSL, $F_{s-1}(\cdot)$ 表示标准正态分布函数的反函数,则所需的安全库存 (safety stock, SS) 可以表示为: $SS = F - 1_s(\text{CSL}) \sigma_L$ 。

2.2 供应链库存控制

假设供应链各节点采用 (s, S) 补货策略,其中 s 为再订货点, S 为设定的最大库存水平。设补货提前期的需求预测为 F_L ,则再订货点 s 可采用 $s = F_L + SS$ 进行初步估算。

假设未满足的需求都会累积在仿真模型中,当下次补货到达后首先予以满足。各决策节点在每个检查周期都会将其现有库存水平与其再订购点 s 进行比较,如果低于 s ,则会发出补货订单,设 I_{it} 为节点 i 在时期 t 的库存水平,则其补货批量为:

$$Q_{it} = \begin{cases} S_i - I_{it} & \text{if } I_{it} < s_i, \\ 0 & \text{if } I_{it} > s_i. \end{cases}$$

如果一个上游节点没有足够的库存满足下游的全部补货订单,对于每个订单的发运数量将按照某种配给规则进行调整,这里采取一种平衡的存货配给规则^[9],假设有 N 个需求节点,设 σ_j 为节点 j 的需求标准差,按 $P_i = [1/(2N)] + \sigma_i^2 / (2 \sum_{j=1}^N \sigma_j^2)$ 确定节点 i 的配给比例,各节点的配给比例之和等于 1。

2.3 启发追踪仿真优化算法

散列搜索 (scatter search, SS) 算法是目前应用于仿真优化比较有效的启发式算法之一,散列搜索仿真优化 (scatter search simulation-optimization, SS-SO) 方法的基本步骤如下。

1) 生成 (s, S) 策略的多样化初始解集合。

2) 当终止标准没有达到时,进行以下循环:①采用交叉结合法并进行供应链系统仿真;②采用局部搜索法并进行供应链系统仿真;③更新参考解集合。

3) 按绩效排序从参考解集合中选出最优解。

由于供应链所处环境区域的市场需求经常具有季节波动性和趋势性,存在一定程度的可预测变化特性,因此在制定库存策略时应考虑到这种规律特性。为充分利用这些信息价值,本文在结合需求预测和 SS-SO 算法基础上提出启发追踪仿真优化法 (heuristic tracking simulation-optimization, HT-SO),利用预测追踪信号估计需求模式的变化,据此更新参考解集的取值范围,指导交叉结合算法在合适的 s (再订货点) 解集区域进行交叉组合。

HT-SO 的算法步骤如下。

1) 生成 (s, S) 策略的多样化初始解集合。

2) 当终止标准没有达到时,进行以下循环:①适应性需求预测追踪;②根据需求预测追踪结果更新 s 的参考解集合范围;③采用有指导的交叉结合法并进行供应链系统仿真;④采用局部搜索法并进行供应链系统仿真;⑤更新参考解集合。

3) 按绩效排序从参考解集合中选出最优解。

3 仿真实验及结果分析

在实际中观测到的需求都可以分解成系统成分和随机成分,系统成分包括需求水平、趋势和季节因子^[10],因此本文采用包括需求水平、趋势项、季节因子和随机成分的组合来生成仿真需求数据。设需求的随机成分呈正态分布,首先使用均值为 100、120、150 和方差为 20、30、50 的正态分布随机数生成器生成需求水平,再按 市场需求 = (结合随机成分的需求水平 + 需求趋势) × 季节因子,与趋势项和季节因子相结合,生成各零售商所对应市场区域的需求数据。假设需求的季节性是按照一周时间循环的,周一至周四为需求淡季,周五至周日为需求旺季,季节因子以 1 为基准,波动率代表一周中各天的季节因子偏离 1 的程度。在需求高波动 (方差系数为 0.05 ~ 0.07) 和低波动 (方差系数为 0.03 ~ 0.05) 两种情况中,分别采用较大和较小的方差以及波动率较大和较小的季节因子。

仿真实验中生成各市场模块需求数据的 Simulink 模型如图 2 所示。其中需求水平采用正态随机数生成,假设需求趋势是中长期缓慢上升的,每两周 (14 d) 上升 1 个单位,因此设需求增长的时间阈值为 14,季节系数采用包括 7 个元素的重复阶梯序列 (repeating sequence stair) 表示,例如在需求低波动情况下市场模块 1 的季节系数设定为 [0.8, 0.5, 0.7, 0.8, 1.2, 1.5, 1.2],产生的需求数据经过圆整函数 (Floor) 后作为市场模块的输出。

对供应链仿真模型的主要运营参数进行设置,包括单位库存持有成本、固定订货成本、补货提前期、最小发货批量和期望周期服务水平等。如图 1 所示,供应链库存决策节点包括 5 个零售商、2 个分销商和 1 个制造商,每个节点有 2 个决策变量 (s 和 S),因此共有 16 个决策变量。分别应用 SS-SO (散列搜索仿真优化法) 和 HT-SO (启发追踪仿真优化法) 进行供应链补货策略的仿真实验,其中参考解集规模设为 30,以一天为一个仿真时间步,在每个时间步,Simulink 模型都更新各决策节

点的状态变量。每次仿真供应链模型运行 250 d，为避免初始条件影响，设仿真预热期为 5 周，从第 6 周开始，选择 210 d（30 周）进行供应链仿真结果的绩效统计。仿真优化算法过程通过 Matlab 脚本程序与 Simulink 模型的交互来实现，主程序调用各算法函数如初始解集生成函数、交叉结合算法函数、局部搜索算法函数以及 Simulink 供应链仿真模型，获得对应策略的仿真绩效结果。启发追踪方法的需求预测追踪算法直接在 Simulink 模型各决策节点的适应性需求预测模块中实现。

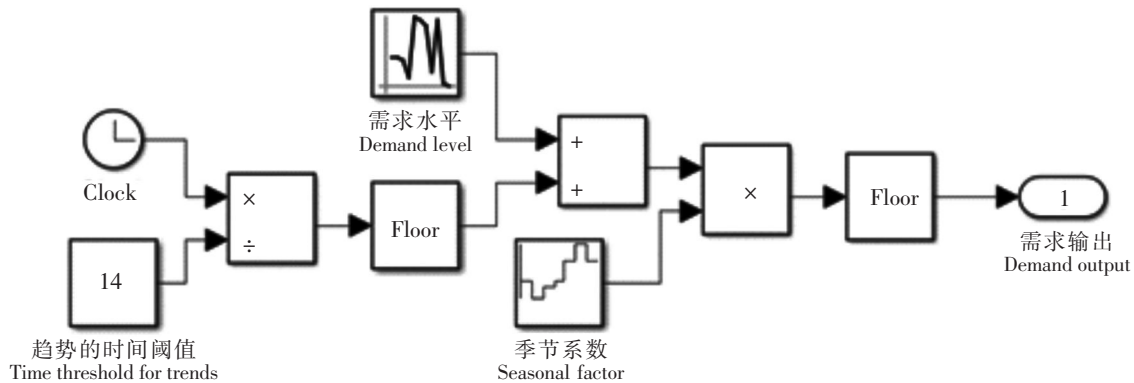


图 2 市场模块的仿真需求数据生成模型

Fig.2 Generation model of simulation demand data in market modules

系统仿真评估的绩效指标为 30 周的供应链平均周利润（mean week - profit）和平均周期服务水平（mean CSL）。采用 HT - SO 策略在高需求波动情况下供应链各节点库存变化的时序图由图 3 和图 4 给出。图 3 中 1 - 5 分别代表不同的零售商；图 4 中 1 - 2 分别代表不同的分销商。

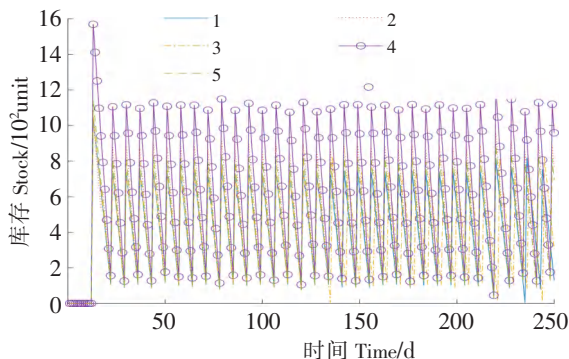


图 3 各零售商库存水平的时序图

Fig.3 Time plot of inventory levels in retailers

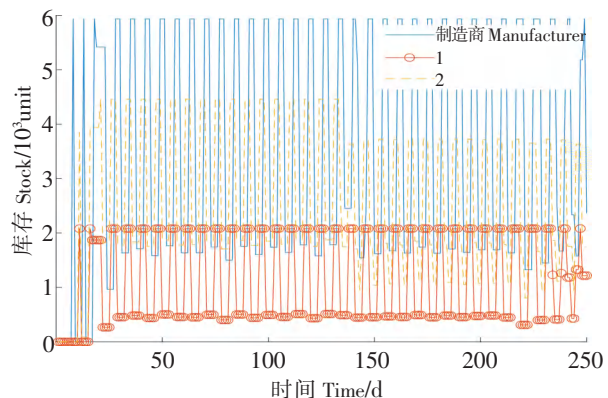


图 4 制造商和各分销商库存水平的时序图

Fig.4 Time plot of inventory levels in manufacturer and distributors

采用两种策略进行仿真的供应链绩效对比结果由表 1 给出。

表 1 两种需求波动情况下的仿真结果

Tab.1 Simulation results under two demand fluctuation scenarios

需求模式 Demand modes	平均周利润 Mean week-profit/元 yuan		平均周期服务水平 Mean CSL	
	低波动 Low fluctuation	高波动 High fluctuation	低波动 Low fluctuation	高波动 High fluctuation
SS - SO	25 290	24 285	0.942	0.921
HT - SO	25 683	25 616	0.948	0.944

由表 1 得出，在需求低波动和高波动两个场景中本文提出的 HT - SO 方法获得的供应链平均周利润均高于 SS - SO 方法。在需求波动较低的场景中差别较小，采用 HT - SO 方法的平均周利润比 SS - SO 方法提高大约 1.5%，平均周期服务水平（mean CSL）值基本相同，由于供应链的供需匹配能力

和总利润水平主要受到供应链中的总库存水平和多级库存动态分布情况影响,说明 SS-SO 方法虽然具有较好的搜索优化能力,但由于没有随需求变化及时调节库存控制策略,使用了较高的供应链总库存水平来应对需求变化,从而增加了供应链库存成本,但在满足供需匹配的效果上并没有超过 HT-SO 方法。而在需求波动较高的场景中,HT-SO 方法的平均周利润提高大约 5.4%,平均周期服务水平也有较明显提高,说明当需求波动趋势较大时,SS-SO 方法为实现供需匹配付出了更高的库存成本,但在满足供需匹配的效果上由于受到需求波动加大影响而下降,而 HT-SO 方法进行动态供需匹配能力更强,多级库存动态分布更合理,能够用相对低的库存水平实现较稳定的供需匹配效果,因此需求追踪启发策略的动态优化效果更明显,能够调节策略适应淡季和旺季的需求模式变化,更好地实现供需匹配。

4 结论

本文将适应性需求预测追踪和启发式仿真优化算法相结合,将供应链上下游环节的决策分析活动如需求动态预测和多级库存计划决策集成在一个模型中进行优化,实现供应链多级库存动态控制决策。应用 Matlab 和 Simulink 工具软件构建了供应链多级库存决策系统的层次化、模块化和可扩展的仿真模型,可为供应链决策者进行决策分析提供一种有效的仿真分析参考工具。今后的研究方向将结合实际应用领域进一步扩展供应链仿真模型结构,并探索应用供应链分布式智能仿真决策模式。

[参考文献]

- [1] BORJA PONTE, ENRIQUE SIERRA, DAVID DE LA FUENTE, et al. Exploring the interaction of inventory policies across the supply chain: an agent-based approach [J]. Computers & Operations Research, 2017, 78: 335-348.
- [2] 李旭, 陆天. 改善供应链库存管理绩效的系统思考: 以啤酒游戏为例 [J]. 系统管理学报, 2019, 28(2): 361-368.
- [3] 陈建华, 吕群英, 曹菁菁. 电商物流多周期库存配送联合决策模型及算法 [J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2019, 41(5): 497-502.
- [4] 燕晨屹, 王喜富, 员丽芬. 复杂供应链网络中牛鞭效应的评估 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(1): 208-213.
- [5] YUNFEI CHU, FENGQI YOU, JOHN M Wassick, Anshul agarwal simulation-based optimization framework for multi-echelon inventory systems under uncertainty [J]. Computers & Chemical Engineering, 2015, 73(2): 1-16.
- [6] MATÍAS SCHUSTER PUGA, STEFAN MINNER, JEAN-SEBASTIEN TANCREZ. Two-stage supply chain design with safety stock placement decisions [J]. International Journal of Production Economics, 2019, 209: 183-193.
- [7] MARIJE NOORDHOEK, WOUT DULLAERT, DAVID S W LAI, et al. A simulation - optimization approach for a service-constrained multi-echelon distribution network [J]. Transportation Research Part E, 2018, 114: 292-311.
- [8] TRAPERO JR, RAMOS F, HOLGADO DE FRUTOS E. A Simulink library for supply chain simulation [C] //Proceedings of 11th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Valencia: WASET, 2017.
- [9] VAN DER HEIJDEN M. Near cost-optimal inventory control policies for divergent networks under fill rate constraints [J]. International Journal of Production Economics, 2000, 63(2): 161-179.
- [10] CHOPRA S, MEINDL P. Supply chain management: strategy, planning, operation [M]. 6rd ed. Beijing: Pearson Education, 2015: 180-194.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)