

考虑中断风险与模糊定价的闭环供应链网络设计模型

吴功兴, 孙兆洋, 琚春华

引用本文

吴功兴, 孙兆洋, 琚春华. [考虑中断风险与模糊定价的闭环供应链网络设计模型](#) [J]. 计算机科学, 2022, 49(7): 220-225.

WU Gong-xing, Sun Zhao-yang, JU Chun-hua. [Closed-loop Supply Chain Network Design Model Considering Interruption Risk and Fuzzy Pricing](#) [J]. Computer Science, 2022, 49(7): 220-225.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[一个基于智能电网的跨层路由的信任评估协议](#)

Trust Evaluation Protocol for Cross-layer Routing Based on Smart Grid

计算机科学, 2021, 48(6A): 491-497. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201000169>

[混合云环境下基于模糊理论的科学 workflow 数据布局策略](#)

Data Placement Strategy of Scientific Workflow Based on Fuzzy Theory in Hybrid Cloud

计算机科学, 2021, 48(11): 199-207. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.200900009>

[基于人工蜂群算法的两阶段图像隐写分析算法](#)

Two-phase Image Steganalysis Algorithm Based on Artificial Bee Colony Algorithm

计算机科学, 2019, 46(6): 174-179. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2019.06.026>

[基于三元概念分析的文本分类算法研究](#)

Research on Text Classification Algorithm Based on Triadic Concept Analysis

计算机科学, 2017, 44(8): 207-215. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2017.08.036>

[软件脆弱性危险程度量化评估模型研究](#)

Research of Evaluating Model on the Criticality of Software Vulnerability

计算机科学, 2011, 38(6): 169-172.

考虑中断风险与模糊定价的闭环供应链网络设计模型

吴功兴¹ 孙兆洋² 琚春华¹

1 浙江工商大学管理工程与电子商务学院 杭州 310018

2 中国标准化研究院高新技术标准化研究所 北京 100191

摘要 为缓解供应中断对企业的打击,文中提出了在竞争环境下考虑模糊定价和中断风险的双目标闭环供应链网络模型。定义不确定需求为供应链及其竞争对手向客户提供的价格函数,使供应链在竞争环境中实现总利润最大化与碳排放量最小化。文中基于可能性理论求解所提模型,将双目标模型转换为单目标模型,最后使用真实案例进行数值算例分析。结果表明,所提模型不仅可以增强供应链抵御风险的能力,还有助于提高其在市场中的战略地位。

关键词: 中断风险;模糊理论;闭环供应链网络

中图法分类号 TP302

Closed-loop Supply Chain Network Design Model Considering Interruption Risk and Fuzzy Pricing

WU Gong-xing¹, Sun Zhao-yang² and JU Chun-hua¹

1 School of Management Science & Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China

2 Institute of High and New Technology Standardization, China Institute of Standardization, Beijing 100191, China

Abstract In order to mitigate the impact of supply interruption on enterprises, a dual objective closed-loop supply chain network model considering fuzzy pricing and interruption risk under competitive environment is proposed. The uncertain demand is defined as the price function provided to customers by the supply chain and its competitors, so that the supply chain can maximize the total profit and minimize the carbon emission in the competitive environment. In this paper, the proposed model is solved based on the possibility theory, and the dual-objective model is transformed into a single-objective model. Finally, a real case is used for numerical example analysis. The conclusion shows that the proposed model can not only enhance the ability of supply chain to resist risks, but also help to improve the strategic position in market.

Keywords Interruption risk, Fuzzy theory, Closed-loop supply chain network

1 引言

近年来,随着全球化进程的不断推进,企业面临的竞争越来越激烈,此背景下的供应链系统亟需考虑中断风险以规避灾难性后果^[1]。2020年初,新冠疫情对全球产业链造成了巨大冲击,既波及了供给侧也波及了总需求,这提醒我们不能只关注短期和局部变化,需要做好长时间应对外部环境变化的准备。若要实现中国经济的良性循环发展,则必须畅通国内、国际两个循环,即畅通国内产业链,着力促进产业基础高级化、产业链现代化;加强国际协调合作,维护国际产业链和供应链的安全稳定;构建促进产业链和供应链稳定发展的政策体系。2020年9月,国家发展改革委等部门联合出台了《推动物流业制造业深度融合创新发展实施方案》,提出了18条重要举措,这对于在当前形势下进一步深入推动物流业和制造业深度融合、创新发展,保持产业链、供应链稳定,构建以

国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局,具有重要指导意义。供应链网络分为两大类,即将原材料流和信息流进行连接的正向链和逆向链^[2]。逆向供应链指消耗产品从消费者流向生产中心,正向/逆向供应链的完整性导致了供应链的闭环^[3],而供应链中的竞争行为可有效帮助企业维持市场份额^[4]。通常可将供应链风险分为中断风险、需求风险和运营风险^[5]。

关于闭环供应链网络设计问题, Farrokh 等^[6]提出了混合整数规划模型(Mixed Integer Programming, MIP),该模型应用动态定价方法将多层多期供应链网络设计问题的总成本降至最低; Xu 等^[7]提出了混合整数非线性规划(Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP)模型,用于解决供应链的不确定性问题;基于此, Liu 等^[8]利用混合方法求解了双目标模型; Oliva 等^[9]在不同情境下对供应链的不确定性进行

到稿日期:2021-01-10 返修日期:2021-07-19

基金项目:国家自然科学基金(71571162);浙江省科技计划项目(2020C01162)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(71571162) and Science and Technology Program of Zhejiang Province(2020C01162).

通信作者:吴功兴(ywngx@zjgsu.edu.cn)

建模,分别针对产出与需求不确定性设计双边随机供应链。综上所述,目前已有的供应链网络多为双目标单层模型,较少有研究参考不确定性理论对中断风险下的闭环供应链网络进行建模。除不确定性问题外,竞争也是闭环供应链网络设计领域中的重要概念。Zhang 等^[10]在竞争环境下设计了闭环供应链网络,分析了竞争对企业利润的影响,上述供应链网络模型大多只考虑竞争环境对利润、需求的影响,因此,考虑碳排放量的绿色闭环供应链网络成为学术界关注的另一热点问题。Aryanezhad 等^[11]考虑了多影响因素下的可持续闭环供应链模型;Zhang 等^[12]提出了双目标绿色闭环供应链模型,通过最优决策最小化总成本与环境成本。综上所述,目前已有的供应链网络大多只考虑了减少碳排放量这一种环保策略,且只将环保策略作为唯一目标函数进行建模。对于中断风险,Zhang 等^[13]在供应链网络中应用模糊规划来降低中断风险;而 Mirialili 等^[14]设计了不确定性下的集成供应链网络模型;Zhang 等^[15]检查了企业供应链中断风险,并在考虑库存成本的基础上寻求整体最优化。综上所述,目前对于供应链中断风险的研究多集中于考虑故障概率等参数。

针对以上问题,本文在考虑中断风险与模糊定价的基础上提出了闭环供应链网络模型,并在考虑双向供应链网络的基础上采用环保策略,利用模糊双层优化方法来应对供应链中需求的不确定性。所提模型可确定外包策略和定价决策,并在竞争环境下使利润最大化。本文还提出了结合 KKT 条件和可能性理论的求解方法,将双目标模型转换为单目标模型,并基于真实案例进行数值算例研究。

本文的主要贡献如下:首先,考虑了模糊定价和中断风险,设计了双目标闭环供应链网络模型;其次,向供应链添加了逆向流与控制碳排放量环保策略;然后,考虑了输入需求的不确定性;另外,所提模型包含竞争环境中的定价、库存、位置、分配决策与价格竞争。最后,所提模型同时考虑了中断与操作风险,并以集成形式进行战略与战术决策,以防止供应中断风险。

2 模型构建与问题描述

本文模型所考虑的供应链网络由相互竞争的领导者供应链与跟随者供应链组成,领导者生产一种产品,而跟随者供应同一市场中的替代产品。除正向供应链外,领导者还在逆向供应链中对收集中心进行检查、分解与再利用。考虑到环境对领导者的影响,本文考虑了两种环保策略:1)添加逆向供应链,重复使用可回收单元以减少碳排放量;2)更新生产线以减少生产过程中的碳排放量。

图 1 给出了所提供供应链模型的总体架构,其中,正向供应链包括供应商、生产中心和分销中心,而逆向供应链包括收集/检查中心、回收中心和处置中心。所提模型中,原材料从供应商转移到生产中心,加工后通过分销中心交付给客户。而已使用过的产品会被运送到收集中心,并被分类为可回收和不可回收单元。其中,可回收单元可在生产过程中使用,也可直接在检验中心使用,还可以外包后再返回生产中心使用,而不可回收单元将被送至处置中心。

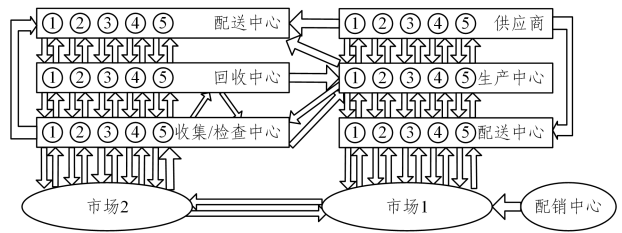


图 1 供应链的总体架构

Fig. 1 Overall architecture of supply chain

首先,市场需求导致领导者与跟随者之间存在竞争关系,且由于需求存在不确定性,因此商品价格都可被视为模糊数。两个竞争的供应链无法合作,意味着每个供应链都将在竞争中采取行动时最大化自身利润与市场份额,且都面临同样的外部竞争,因此最初价格为市场竞争的结果。该非合作博弈问题可分为主要问题与从属问题,主要问题优化了领导者企业的供应链结构,从属问题分析了跟随者的最优决策。假定每个供应链需求都与自身零售价格成反比,与竞争企业的商品价格成正比。因此,供应链网络的最优目标为领导者找到正/逆向供应链网络的最优结构与设计,最大化整体利润。本文假设领导者中的生产成本均相等,供应商仅面临中断风险,各企业供应链需求都需重视领导者/跟随者的产品价格。

2.1 符号说明

在竞争环境下考虑中断风险和模糊定价的闭环供应链网络设计模型,其中集合、参数与决策变量符号的定义如下。 $l \in L$ 为收集/检查中心集, $o \in O$ 为回收中心集, $g \in G$ 为处理中心集, B 取值为 1 和 2 时分别表示新、老生产线集, $t \in T$ 表示时间周期集, $s \in S$ 为情景集, $i \in I$ 为不可靠供应商, $i' \in I'$ 为可靠供应商, $j \in J$ 为生产中心集, $K = \{K_1 \cup K_2\}$ 为配送中心集, $k_1 \in K_1, k_2 = k_1 + 1 \in K_2$ 为配送中心位置集, $c_1 \in C_1$ 和 $c_2 \in C_2$ 分别为初级/次级市场集合, $P = \{P_1 \cup P_2\}$ 为原材料集合, $p_1 \in P_1$ 为可循环原材料集, $p_2 \in P_2$ 为不可循环原材料集, cp_i 为产品生产成本, $tcp_{i,j}$ 为从不可靠供应商到生产中心的运输成本, $\overline{tcp}_{i',j}$ 为从可靠供应商到生产中心的运输成本, $tcd_{j,k}$ 为从生产中心到配送中心的运输成本, tcc_{k,c_1} 为从配送中心到初次市场的运输成本, $tcl_{c_2,l}$ 为从第二市场到检验中心的运输成本, $tcrc_{i,j}$ 为从检验中心到生产中心的运输成本, $tcg_{i,g}$ 为从检验中心到处置中心的运输成本, $tco_{i,o}$ 为从检验中心到回收中心的运输成本, $trc_{o,j}$ 为从回收中心到生产中心的运输成本, $F_{k_2}^L$ 为领导企业开设配送中心的固定成本, FC_i^L 为领导企业开设检验中心的固定成本, FG_j^L 为领导企业生产中心配备环保设备的固定成本, hd_K 为配送中心的持有成本, hc_l 为检验中心的持有成本, hs_j 为生产中心的原材料持有成本, $prr_{c_2,i,t}^L$ 为领导者在 t 时段提供的次级市场的回购价格, $caps_i$ 为不可靠供应商的最大生产能力, $\overline{caps}_{i'}$ 为可靠供应商的最大容量, B_p 为生产设备的成本, cap_{h_j} 为生产中心的最大原料容量, cap_{p_j} 为生产中心的最大生产容量, cap_{d_k} 为配送中心的最大容量, cap_{c_l} 为检验中心的最大承载量, cap_{o_o} 为回收中心的最大承载量, cap^F 为跟随者的最大容量, $EM_{b,j}$ 为生产中心中生产线的碳排放量, $\lambda_{s_i,t}$ 为不可靠供应商的中断概率, π_s 为中断概率, $\tilde{\alpha}$ 为供应商需求对自身价格的敏感性, $\tilde{\beta}$ 为供应商需求对竞争者

价格的敏感性, d^L 为领导者产品的市场需求, d^F 为跟随者最终产品的市场需求, α_R 为二手产品从次级市场到检验中心的退货率, $\gamma_1^{p_1}$ 为可回收单位获得的原材料比例, $\gamma_2^{p_1}$ 为可回收单位间接获得的原材料比例, S^L 为最终产品从领导者运往初次市场的上限, S^F 为最终产品从跟随者运往初次市场的上阈值, $D_{c_1,t}$ 为领导客户在 t 时段的总需求, cc_1 为检验中心产品的检验费用, Rc_o 为回收中心的回收成本, c^F 为跟随竞争者产品的生产、运输和分销成本, ξ 为 $\tilde{\beta}$ 的模糊约束数, η 为 $\tilde{\alpha}$ 的模糊约束数, $x_{k_2}^L$ 为配送中心是否位于领导者位置的虚拟变量, y_i^L 为检验中心是否位于领导者位置的虚拟变量, E_i^L 为领导者是否与可靠供应商签订合同的虚拟变量, $W_{i,j,t,s}^L$ 为生产中心分配给不可靠供应商的虚拟变量, $\bar{W}_{i',j,t,s}^L$ 为生产中心分配给可靠供应商的虚拟变量, $\varphi_{b,j}$ 为生产中心是否在生产线上配备环保设备的虚拟变量, $Q_{k,c_1,t,s}^L$ 为配送中心向初次市场运输的领导者产品数量, $Q_{i,j,t,s}^{R,P_1}$ 为产品从跟随者运输到初次市场的数量, $Q_{i,j,t,s}^{L,P}$ 为领导者将原材料从不可靠供应商运至生产中心的数量, $\bar{Q}_{i',j,t,s}^{L,P}$ 为原材料从可靠供应商向生产中心运输的领导者数量, $Q_{i,k,t,s}^L$ 为生产中心运送到配送中心的产品量, $Q_{c_2,t,s}^R$ 为次级市场到检验中心的退货数量, $Q_{i,g,t,s}^{R,P}$ 为检验中心运送至处置中心的不可回收产品数量, $Q_{i,j,t,s}^{R,P_1}$ 为检验中心运送至生产中心的直接可回收产品数量, $Q_{i,o,t,s}^{R,P_1}$ 为检验中心运送至回收中心的间接可回收产品数量, $Q_{o,j,t,s}^{R,P_1}$ 为回收中心运送至生产中心的回收产品数量, $D_{c_1,t,s}^F$ 为领导者对跟随者的需求, $D_{c_1,t,s}^L$ 为客户对领导者的产品需求, $Pr_{c_1,t,s}^L$ 为领导者为客户提供的价格, $Pr_{c_1,t,s}^F$ 为跟随者提供给客户的产品价格, $Ind_{k,t,s}$ 为配送中心的产品库存, $In_{l,t,s}$ 为检验中心的总库存, $pro_{b,j,t,s}$ 为生产中心特定生产线的产出量, $In_{s,t,s}^L$ 为生产中心的原材料库存量, $R_{c_2,t,s}^L$ 为次级市场的退货量。

2.2 领导者与跟随者

用于优化领导者决策的主要问题的模型的首要目标函数如式(1)所示, 其旨在使领导者供应链利润最大化。其中, 第一项代表领导者通过向市场出售最终产品获得的总收入, 第二项代表其他相关成本。本文注意到, 旧生产线的运转是没有任何成本的, 因此环保设备成本为开设新生产线的成本。

$$\begin{aligned} Z_1 = \text{Max} \sum_{k,c_1,t,s} pr_{c_1,t,s}^L * Q_{k,c_1,t,s}^L * \pi_s - \{ \sum_{k_2} \chi_{k_2}^L * F_{k_2}^L + \sum_l y_l^L * F_{c_l}^L + \sum_{i'} E_{i'}^L * co_{i'}^L + \sum_{b,j} \varphi_{b,j}^L * FG_{b,j}^L + \sum_{j,b,t} \pi_s * [\sum_{j,b,t} cp_j * pro_{b,j,t} + \sum_{l,c_2,t} Q_{c_2,t,s}^R * cc_l + \sum_{i',j,t,P} \bar{Q}_{i',j,t,s}^{L,P} * tcp + \sum_{i,j,t,P} Q_{i,j,t,s}^{L,P} * tcp_{i,j} + \sum_{j,k,t} Q_{j,k,t,s}^L * tcd_{j,k} + \sum_{i,j} Q_{i,j,t,s}^L * tcl_{i,j} + \sum_{c_2,t} Q_{c_2,t,s}^R * tcl_{c_2,t} + \sum_{l,g,t} Q_{l,g,t,s}^R * tcl_{l,g} + \sum_{l,j,t,P_1} Q_{l,j,t,s}^{R,P_1} * tcr_{l,j} + \sum_{l,o,t,P_1} Q_{l,o,t,s}^{R,P_1} * tco_{l,o} + \sum_{o,j,t,P_1} Q_{o,j,t,s}^{R,P_1} * trc_{o,j} + \sum_{l,c_2,t} Q_{c_2,t,s}^R * prr_{c_2,t,s}^L + \sum_{k,t} Ind_{k,t,s} * hd_k + \sum_{s,l,t} In_{l,t,s} * hc_l + \sum_{s,j,t} In_{j,t,s} * hs_j] \} \quad (1) \end{aligned}$$

而所提模型的第二个目标函数如式(2)所示, 其旨在使生产和运输过程中来自领导者供应链不同级别的碳排放量最小化; 式(3)所述约束条件旨在保证转移产品数量不大于生产中心的调度能力和分配中心的接纳能力之和; 式(4)

表示供应链整体的容量限制。

$$Z_2 = \sum_{j,b,k,t,s} EM_{b,j} * Q_{j,k,t,s}^L \quad (2)$$

$$cap_{s_j} p_j \geq \sum_{i,i',p} (Q_i^L + \bar{Q}_{i'}^L) + \sum_{l,p_1} Q_l^L + \sum_{o,p_1} Q_o^L \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \{ \sum_j Q_{j,k,t,s}^L * \sum_{c_1} Q_{k,c_1,t,s}^L, \sum_k Q_{j,k,t,s}^L * \sum_j Q_{j,k,t,s}^L, \sum_j Q_{i,j,t,s}^L * \sum_j Q_{i,j,t,s}^L, \sum_j \bar{Q}_{i',j,t,s}^{L,P} * \sum_j \bar{Q}_{i',j,t,s}^{L,P} \} \\ \leq \{ \chi_{k_2}^L * cap_{d_k}, \chi_{k_2}^L * cap_{d_k}, cap_{p_j}, x_{k_2}^L * cap_{d_k}, cap_{s_i}, \overline{cap_{s_i'}} \} \quad (4) \end{aligned}$$

而式(5)所示的约束条件旨在确保领导者供应链通过其分销渠道完全满足初次市场的需求, 且确保领导者和跟随者在初级市场中满足的需求量等于总市场需求; 式(6)所示的约束条件旨在使所有退回产品都转移到生产、回收或处置中心, 并反映生产、回收和处置中心间的平衡关系。

$$\{ D_{c_1,t,s}^L, D_{c_1,t,s}^F \} = \{ \sum_{k \in K_1} Q_{k,c_1,t,s}^L + \sum_{k \in K_2} Q_{k,c_1,t,s}^L, d^L - \tilde{\alpha} pr_{c_1,t,s}^L + \tilde{\beta} pr_{c_1,t,s}^F + D_{c_1,t,s}^L \} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sum_{c_2} Q_{c_2,t,s}^R = \{ \gamma_1^{p_1} * \sum_{c_2} Q_{c_2,t,s}^R, \gamma_2^{p_1} * \sum_{l,c_2} Q_{c_2,t,s}^R, \sum_l Q_{l,t,s}^R, \\ \sum_{l,c_2} Q_{c_2,t,s}^R - \sum_{l,c_2} Q_{c_2,t,s}^R * (\gamma_1^{p_1} - \gamma_2^{p_1}) \} \quad (6) \end{aligned}$$

而式(7)旨在保证类型 p 产品的库存流量和产品库存之间的平衡, 而式(8)所示的约束条件可使转移单元的总库存不违反供应链总体的转换能力, 且保障使原材料从供应商发送到生产中心, 并在该时间段内分配原材料。

$$\begin{aligned} \{ In_{i,t,s}^p, Ind_{k,t,s} \} = \{ \sum_i Q_{i,j,t,s}^{L,P} + \sum_{i'} \bar{Q}_{i',j,t,s}^{L,P} - B_p * \sum_{b,j} pro_{b,j,t,s} + \\ In_{i,t,s}^p + \sum_o Q_{o,j,t,s}^{R,P_1}, \sum_j Q_{j,k,t,s}^L - \sum_{c_1} Q_{k,c_1,t,s}^L + \\ Ind_{k,t,s} \} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\{ pro_{b,j,i,t,s}, pro_{b,j,t,s} \} \geq \sum_{i,i',l,o} \{ lns_{i',l,t,s}^p + Q_{i',l,t,s}^{L,P} + \bar{Q}_{i',l,t,s}^{L,P} + Q_{i,j,t,s}^{R,P_1} + Q_{o,j,t,s}^{R,P_1}, lns_{i',l,t,s}^p + Q_{i,j,t,s}^{L,P} + Q_{l,j,t,s}^{L,P} \} / B_p \quad (8)$$

目标函数式(9)旨在最大化跟随者利润, 而 $\sum_{c_1} Q_{c_1,t,s}^F \leq cap^F$ 确保跟随者给初级市场提供的产品量低于容量限制, 且使得初次市场的总需求分别对其竞争者和自身价格有正向和反向的敏感性。

$$\begin{aligned} Z_3 = \text{Max} \sum_{c_1,t,s} pr_{c_1,t,s}^F * (d^F - \tilde{\beta} * pr_{c_1,t,s}^F + \tilde{\alpha} * pr_{c_1,t,s}^L) - \\ Q_{c_1,t,s}^F * c^F \quad (9) \end{aligned}$$

2.3 规划方法与模型线性化

由于上述需求函数中使用了模糊数, 因此所提模型具有不确定性。不确定性通常指在目标函数或约束中包含不确定系数。故可由不确定系数定义式(10)和式(11)。

$$\begin{aligned} d^F - ((2 - \xi)(\beta^0 + \beta^m) + \xi * (\beta^m + \beta^p)) * pr_{c_1,t,s}^F / 4 + \\ ((2 - \eta)(\alpha^0 + \alpha^m) + \eta * (\alpha^m + \alpha^p)) pr_{c_1,t,s}^L / 4 \leq D_{c_1,t,s}^F \leq d^F - \\ (\xi * (\beta^0 + \beta^m) + (2 - \xi)(\beta^m + \beta^p)) * pr_{c_1,t,s}^F / 4 + (\eta * (\alpha^0 + \alpha^m) + (2 - \eta) * (\alpha^m + \alpha^p)) * pr_{c_1,t,s}^L / 4 \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d^L - ((2 - \eta) * (\alpha^0 + \alpha^m) + \eta * (\alpha^m + \alpha^p)) * pr_{c_1,t,s}^L / 4 + \\ ((2 - \xi) * (\beta^0 + \beta^m) + \xi * (\beta^m + \beta^p)) * pr_{c_1,t,s}^F / 4 \leq D_{c_1,t,s}^L \leq \\ d^L - (\eta * (\alpha^0 + \alpha^m) + (2 - \eta) * (\alpha^m + \alpha^p)) * pr_{c_1,t,s}^L / 4 + \\ (\xi * (\beta^0 + \beta^m) + (2 - \xi) * (\beta^m + \beta^p)) pr_{c_1,t,s}^F / 4 \quad (11) \end{aligned}$$

本文模型为具有非线性目标函数的混合整数规划模型。目标函数的非线性是通过将两个连续变量分别与领导者目标

函数以及跟随者目标函数相乘得到。本文使用 McCormick 包络实现模型线性化^[16-17]。其中领导者有权指定上限或下限作为产品售价,以决定追随者的售价范围,且可将连续变量替换为非线性项,如式(12)所示。最后,将式(13)和式(14)所示的约束条件添加至领导者和跟随者问题中,利用 McCor-mick 包络法使其线性化,并将非线性项替换为连续变量。

$$\{G_{k,c_1,t,s}^L,G_{c_1,t,s}^F\}=pr_{c_1,t,s}^L*\{Q_{k,c_1,t,s}^L,D_{c_1,t,s}^F\}\tag{12}$$

$$\{UB^L*Q_{k,c_1,t,s}^L+S^L*pr_{c_1,t,s}^L-S^L*UB^L,LB^L*Q_{k,c_1,t,s}^L\}\leqslant G_{k,c_1,t,s}^L\leqslant\{S^L*pr_{c_1,t,s}^L+LB^L*Q_{k,c_1,t,s}^L,UB^L*Q_{k,c_1,t,s}^L\}\tag{13}$$

$$\{UB^F*D_{c_1,t,s}^F+S^F*pr_{c_1,t,s}^F-S^F*UB^F,LB^F*D_{c_1,t,s}^F\}\leqslant G_{c_1,t,s}^F\leqslant\{S^F*pr_{c_1,t,s}^F+LB^F*D_{c_1,t,s}^F,UB^F*D_{c_1,t,s}^F\}\tag{14}$$

3 模型求解方法

本文将双层模型整合为单变量模型,使用非线性规划模型表示供应链间的竞争。模型中存在领导者和跟随者,参考 Rad 等^[18]的做法,采用 KKT 将其作为约束条件添加到问题中,从而将双层模型转换为单层模型,并将最大化问题条件设置为式(15)和式(16)。

$$\text{Max } Z=f(\chi_1,\cdots,\chi_i)=\sum_{i=1}^m\lambda_i*g_i(\chi_i)\tag{15}$$

$$g_i(\chi_i)-b_i\leqslant\lambda_i*(g_i(\chi_i)-b_i)=0\leqslant\lambda_i\tag{16}$$

基于此,可将文献[19]中的约束条件添加至上层供应链问题中创建单层模型。通过实施 KKT 条件不会造成非线性约束,因此可通过 $\gamma_i-M*v_i*G_i(c,v)-M*(1-v_i)\leqslant 0$ 引入变量 v_i 来实现线性化,且多目标规划允许可用决策变量对多个目标函数进行优化^[20]。本文使用 ϵ 约束方法将所提模型转换为单目标模型,以控制解决方案的数量^[21],目标函数边界通过 $Z_i(\chi)\leqslant \epsilon_i$ 进行约束。且对于任意 $k\in\{1,2,\cdots,K\}$ 都有 $\epsilon_i=Z_i(x^*)$,而 $x^*\in\chi$ 为唯一帕累托最优解。当对任何给定向量 $\epsilon=\{\epsilon_1,\epsilon_2,\cdots,\epsilon_k\}$ 时, $x^*\in\chi$ 为帕累托最优解。而 ϵ 约束方法可应用于两个目标函数 $\{Z_1,Z_2\}$ 中, Z_1 保留为目标函数,而 Z_2 转换为上限 ϵ_2 的约束条件 $\min_{x\in\chi}Z_1(x),Z_2(x)\leqslant \epsilon_2$ 。因此可将双目标模型转变为单目标模型,除满足 KTT 条件外还满足 $\sum_{j,b,k,t,s}EM_{b,j}*Q_{j,k,t,s}^L\leqslant \epsilon$ 约束条件。

4 数值算例

4.1 实验设置

本文就所提模型给出数值算例,以大宗商品海运业中较为出名的跨国公司 M 为例进行参数设置,并基于此案例企业形成仿真供应链网络数据集(包含 142 个节点和 2 412 条边)。由于该行业中存在竞争,且追求低污染与低成本,因此该公司的处境较适用于本文模型。为更直观地分析所提模型的运行效果,本文使用 MATLABR2010a 软件包,并参考文献[12]来设置参数数值。计算机配置为: Intel(R)Core(TM)i5 2.8GHz,8GB 内存,64 位 Windows10 操作系统。经过对 M 公司的深入调研和对相关高管进行深度访谈,本文设置公司拥有若干供应商、生产中心、分销中心、收集中心、处理中心、回收中心、客户、市场和原材料,并假设存在多个时间段和情景。本研究团队在 Tensorflow1.5.1 上实施了所提模型,实验过程采取分组进行的方式,将数据等分为 10 组,采用交叉验证的方式,即将数据集划分为 10 等份,每次选取一组数据作为测试集,其他组作为训练集,最终取平均值,并将所有数据以 CSV 格式保存在 MySQL 数据库中以便进行数据处理。使用 Weka 数据挖掘工具随机选取各用户评级数据的 10%,并将其作为测试集,并将其余 90%的用户数据作为训练集。实验在 Linux 操作系统的服务器(Intel Xeon 处理器(34GHz)和 32GB 内存)上进行。由于实验中的供应链网络模型在每次运行时的结果都可能不同,因此设置评估结果为迭代 500 次运行后的平均值,运行的平均标准差为 1.626。使用 Pajek4.05,Gephi 和 MATLAB7.0 等软件生成与构建供应链网络。

4.2 实验结果

为测试所提模型的准确性,实验对持有成本参数、持有库存与利润进行了敏感性分析,结果如表 1 所列。可以看出,通过增加持有成本,可使所有时段内的总持有库存量和利润都减少,证明了所提模型较为合理,并基于此开展了碳排放量的敏感性分析。表 2 列出了碳排放量与领导企业总利润间的敏感性分析结果,当碳排放量变大时,其与领导企业总利润的关系呈倒 U。

表 1 持有成本的敏感性分析结果

Table 1 Results of sensitivity analysis of carrying cost

时间周期	单位周期内库存					单位周期内利润				
	30	35	40	45	50	30	35	40	45	50
1	85.420	83.210	82.140	85.220	78.480	0.632	0.621	0.614	0.602	0.594
2	94.210	84.280	82.790	80.480	80.240	0.627	0.623	0.632	0.588	0.584
3	91.700	86.170	87.100	81.470	81.460	0.609	0.594	0.584	0.589	0.563
4	89.300	91.380	86.460	86.220	78.200	0.597	0.580	0.580	0.564	0.567
5	88.170	90.550	85.220	83.170	78.220	0.590	0.595	0.572	0.574	0.579
总持有库存/利润	448.800	435.590	423.710	416.560	396.600	3.055	3.013	2.982	2.917	2.887

表 2 碳排放量的敏感性分析结果

Table 2 Results of carbon emission sensitivity analysis

碳排放量	单位周期内库存					单位周期内利润				
	30	35	40	45	50	30	35	40	45	50
0%	85.420	83.210	82.140	85.220	78.480	0.632	0.621	0.614	0.602	0.594
10%	93.170	86.540	88.030	84.390	85.360	0.786	0.724	0.720	0.707	0.746
20%	94.530	87.590	95.130	90.350	89.450	0.833	0.780	0.735	0.792	0.755
30%	97.670	93.320	95.140	96.400	91.630	0.754	0.739	0.720	0.734	0.724
40%	100.170	97.680	95.960	97.190	92.370	0.682	0.649	0.659	0.604	0.628
总持有库存/利润	470.960	448.340	456.400	453.550	437.290	3.687	3.513	3.448	3.439	3.447

由于可能在闭环供应链网络中同时进行新产品的制造和旧产品的改造,因此产能会严重限制和影响闭环供应链网络的性能,故本文对生产能力随供应链性能的变化进行了敏感性分析,结果如图 2 所示。可以看出,收集、检查和分销中心在节省成本方面效果更优。为检验竞争对领导者供应链收入和跟随者供应链收入的影响,实验分别在考虑和不考虑竞争要素的情况下对模型进行求解,结果如图 3 所示。可以看出,领导者供应链可通过决定同一市场中的产品售价来进行竞争,以获得更多利润,而在此情况下追随者供应链利润会减少。因此作为领导者,制造商应进行更多的竞争以获取利润,并使得市场状况更加稳定。

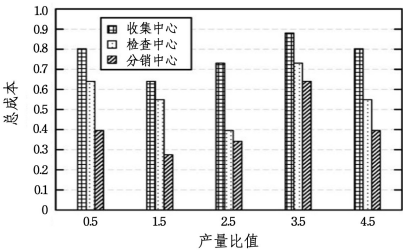


图 2 生产能力随供应链性能变化的敏感性分析结果
Fig. 2 Results of sensitivity analysis of production capacity to supply chain performance

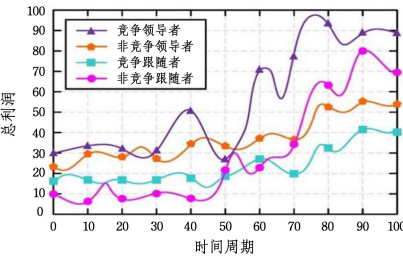


图 3 竞争要素对供应链总收入的影响
Fig. 3 Influence of competitive factors on total revenue of supply chain

如图 4 所示,在需求函数中,通过增加竞争者价格系数,跟随者的供应链需求会减少;而当竞争者价格系数上升时,领导者供应链的需求会逐渐增加,且当系数从 0.6 上升到 0.8 时,总利润增加幅度最大。本文对中断进行了敏感性分析,以确定中断对利润的影响。表 3 列出了不同时段计划中和计划后中断的概率均值。可以看出,计划中中断的供应链利润明显比计划后中断受到了更大的影响,因此在供应链设计中考虑中断情况的概率将有助于避免中断成本。

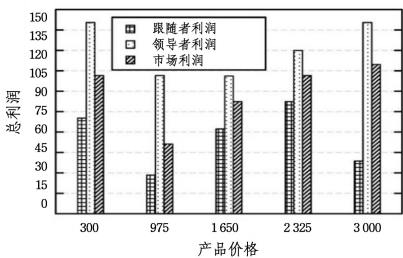


图 4 产品价格对总利润的影响
Fig. 4 Impact of product price on total profit

表 3 中断对企业供应链利润的影响

Table 3 Impact of disruption on profit of enterprise supply chain

时间周期	计划中中断	计划后中断
1	27.31	25.14
2	27.43	25.49
3	27.31	26.12
4	28.42	24.80
5	27.10	25.39
6	28.27	25.03
7	27.63	24.52
8	26.23	26.44
总利润	219.70	202.93

表 4、表 5 列出了战略与运营成本对供应链的敏感性分析,可以看出,当不存在外包时,战略成本与运营成本没有受到显著影响。且在不进行外包的情景下,总成本随时间的推移先呈增长趋势,再趋于平稳;而在进行外包的情况下,总成本随时间推移几乎不变。另外,短期外包的总成本大于不外包的成本,但长期进行外包的总成本小于不外包的总成本,因此长期实行外包策略有利于降低供应链的总成本。

表 4 战略对供应链的敏感性分析

Table 4 Sensitivity analysis of strategic to supply chain

战略成本	单位周期持有库存		单位周期企业利润		单位周期总成本	
	外包	不外包	外包	不外包	外包	不外包
10	88.310	85.140	0.833	0.623	18.140	5.290
20	91.31	86.540	0.865	0.647	18.150	13.220
30	91.700	80.210	0.798	0.622	18.140	17.450
40	92.540	86.440	0.815	0.525	18.110	29.090
50	87.230	89.640	0.770	0.615	18.130	34.140
总计	451.090	427.970	4.081	3.032	90.670	99.190

表 5 运营成本对供应链的敏感性分析

Table 5 Sensitivity analysis of operational costs to supply chain

运营成本	单位周期持有库存		单位周期企业利润		单位周期总成本	
	外包	不外包	外包	不外包	外包	不外包
5	84.530	83.220	0.775	0.540	18.330	6.280
25	86.590	82.900	0.748	0.584	18.250	20.130
30	87.430	83.140	0.760	0.614	18.350	25.420
35	86.590	82.470	0.819	0.538	18.140	28.490
40	85.430	85.190	0.803	0.647	18.510	31.440
总计	430.570	416.920	3.905	2.923	91.580	111.760

结束语 本文设计了考虑模糊定价和中断风险的双目标闭环供应链网络模型,并考虑了供应链中的两种环保策略。在该模型中,不确定需求被定义为供应链及其竞争对手向客户提供的价格函数,并假设其中的需求价格系数为模糊数。本文引入博弈论为两个供应链引入双层模型。所提模型可确定外包策略与定价决策,使供应链实现总利润最大化与碳排放量最小化。本文还提出了所提模型的求解方法,并使用约束方法将集成双目标模型转换为单目标模型,最后基于真实案例进行数值算例和敏感性分析,以评估其有效性。实验结论如下:所提模型不仅可增强供应链抵御市场风险的能力,且有助于提高其在市场中的战略地位。关注需求函数中的产品价格系数可帮助管理者分析客户意愿及客户对价格的态度,在供应链中同时考虑多种环保策略能更好地改善生产过程,提高生产效率,也可激励客户对环保产品的购买。

参考文献

[1] ZHANG S T,ZHANG P P,ZHANG M,et al. Emergency stra-

- tegy of supply chain with lead times under stochastic supply disruptions [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(3): 772-779.
- [2] PISHVAEE M, RABBANI M, TORABI S. A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty[J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(2): 637-649.
- [3] ZHOU M S, ZHANG Q Y. Big data investment decisions in a supply chain under the impact of transparency and competition [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2018, 38(12): 2993-3009.
- [4] FARROKH M, AZAR A, JANDAGHI G, et al. A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2018, 341: 69-91.
- [5] YANG Y X, MENG L J, ZHANG B Y, et al. Supply chain network production and outsourcing decision under competition environment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 214-223.
- [6] FARROKH M, AZAR A, JANDAGHI G, et al. A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2018, 341: 69-91.
- [7] XU J, LIU Q, WANG R. A class of multi-objective supply chain networks optimal model under random fuzzy environment and its application to the industry of chinese liquor[J]. Information Sciences, 2008, 178(8): 2022-2043.
- [8] LIU J G, WANG J J, ZHOU J X, et al. Research on Supply Chain Contract Coordination of Diferent Replenishment Strategies under Uncertain Environment [J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(9): 68-79.
- [9] OLIVA D, MOHAMED A E A, HASSANIEN A E. Parameter estimation of photovoltaic cells using an improved chaotic whale optimization algorithm[J]. Applied Energy, 2017, 200(15): 141-154.
- [10] ZHANG G T, SUN H, HU J S. Multi-Aeriod Closed-Loop Supply Chain Network Equilibrium Based on Constrained Inventory [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2017, 31(1): 176-184.
- [11] ARYANEZHAD M B, JALALI S G, JABBAEZADEH A. An integrated supply chain design model with random disruptions consideration[J]. African Journal of Business Management, 2010, 4(12): 1-22.
- [12] ZHANG L, BI X J, WANG Y J. The ϵ Constrained Multi-objective Decomposition Optimization Algorithm Based on Re-matching Strategy[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(5): 1032-1040.
- [13] ZHANG X, ZHAO G, LI B. Multi-objective fuzzy programming for sustainable closed-loop supply chain network design [J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(3): 513-527.
- [14] MIRIALILI S, LEWIS A. The Whale Optimization Algorithm [J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95(5): 51-67.
- [15] ZHANG Y B, LONG J, CHEN Y. Contingency Police and Operation Simulation of Supply Chain Disruption with Changing Demand[J]. Journal of Systems & Management, 2019, 28(6): 1202-1210.
- [16] SUN Y, LI Y, XIONG W, et al. Pareto Optimal Solutions for Network Defense Strategy Selection Simulator in Multi-Objective Reinforcement Learning[J]. Applied Sciences, 2018, 8(1): 1-36.
- [17] YI G, MAO J Y, WANG Y N, et al. Research on Supply Chain Contract Coordination of Different Replenishment Strategies under Uncertain Environment [J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(7): 895-902.
- [18] RAD R S, NAHAVANDI N. A novel multi-objective optimization model for integrated problem of green closed loop supply chain network design and quantity discount [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 196: 1549-1565.
- [19] PANG Q, ZOU T, CONG Q M. Distributed predictive control method with zone control for insensitive system under network environment[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(4): 504-512.
- [20] ZHANG Y Y, JIN Z G, CHEN Y. Hybrid teaching-learning-based optimization and neural network algorithm for engineering design optimization problems [J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 23(1): 1-24.
- [21] HASANI A, KHOSROJERDI A. Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 87: 20-52.



WU Gong-xing, born in 1974, Ph.D, associate professor. His main research interests include intelligent information processing, data mining, e-commerce and logistics optimization, etc.