

具有风险规避型零售商的闭环供应链网络均衡分析

曹晓刚¹, 郑本荣¹, 夏火松¹, 闻 卉², 黎继子¹

(1. 武汉纺织大学 管理学院, 武汉 430073; 2. 湖北工业大学 理学院, 武汉 430068)

摘要: 在随机需求条件下研究了由多个相互竞争的供应商、制造商、零售商和消费市场组成, 且零售商具有风险规避特性的再制造闭环供应链网络均衡问题. 通过对不同决策层级最优化行为的分析, 分别得到各层级和整个供应链网络实现均衡的条件, 并建立相关的变分不等式模型. 运用拟牛顿算法对变分不等式进行求解, 通过仿真分析了随机再制造率和零售商的风险规避程度对网络成员最优行为和闭环供应链网络均衡的影响.

关键词: 闭环供应链网络; 再制造; 风险规避; 变分不等式

中图分类号: F274

文献标志码: A

Analysis on closed-loop supply chain network equilibrium with risk-averse retailers

CAO Xiao-gang¹, ZHENG Ben-rong¹, XIA Huo-song¹, WEN Hui², LI Ji-zi¹

(1. School of Management, Wuhan Textile University, Wuhan 430073, China; 2. School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China. Correspondent: CAO Xiao-gang, E-mail: caoxiaogang1982@hotmail.com)

Abstract: A closed-loop supply chain network equilibrium problem is studied, which consists of multiple competitive suppliers, multiple manufacturers, and multiple risk averse retailers with stochastic demand markets. Through the analysis of the network structure, the equilibrium conditions of various decision makers and the whole closed-loop supply chain network are derived and the finite-dimensional variational inequality formulation is established. Finally, based on the characteristics of the model, the Quasi-Newton method is built to solve the problem, and the simulation analysis illustrates the impacts of the stochastic remanufacturing rate and the risk averse coefficient of retailers on the optimal behaviors and network equilibrium.

Key words: closed-loop supply chain network; remanufacturing; risk aversion; variational inequality

0 引 言

随着经济全球化和市场竞争的不断加剧, 我国经济发展模式正经历着从传统模式向循环经济发展模式的不断转变, 而闭环供应链的实施为经济、社会和环境的可持续发展提供了战略性的理论范式. 从供应链网络的角度看, 闭环供应链网络中处于不同层级的决策成员之间是一种竞争和合作的关系, 成员之间的利益经常不一致或者冲突. 那么, 如何准确刻画闭环供应链网络结构和成员之间的竞争和协调关系, 研究竞争型闭环供应链的网络均衡决策尤为重要.

对于供应链网络中各决策成员最优行为的分析, 文献[1]在确定性需求下较早地建立了一般的网络均衡模型, 并证明了网络均衡解的惟一性和存在性. 文

献[2]和文献[3]分别将均衡模型扩展至随机需求和模糊需求情形. 文献[4]针对食品供应链网络的动态性特点, 运用变分不等式的方法建立了供应链网络均衡模型并进行了分析. 总体看, 目前关于供应链网络均衡问题的研究已取得较多阶段性的成果, 但关于闭环供应链网络均衡问题的研究还较为缺乏. 文献[5]考虑废旧电子产品的回收活动, 得到了各层级决策者的最优行为和实现均衡的条件, 但模型中并未考虑回收产品的再制造. 文献[6]运用变分不等式方法建立了由制造商和需求市场构成的两级闭环供应链网络均衡模型, 文献[7]在此基础上将闭环供应链网络均衡模型扩展到不确定需求情形. 文献[8-9]在随机需求情形下建立了多层竞争型闭环供应链网络

收稿日期: 2012-12-12; 修回日期: 2013-05-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71301126, 71171153); 教育部人文社会科学基金项目(11YJC630011); 中国博士后科学基金项目(2012M511215, 2013T60723); 湖北省教育厅人文社会科学研究项目(2010Q054, 2012G080).

作者简介: 曹晓刚(1982—), 男, 副教授, 博士, 从事再制造与闭环供应链的研究; 郑本荣(1988—), 男, 硕士生, 从事闭环供应链的研究.

均衡模型,并在此基础上构建了均衡约束数学规划模型,即设施竞争选址模型.文献[10]建立了闭环供应链超网络均衡模型,并分析了回收率等参数的变化对闭环供应链网络均衡的影响.

上述研究均是建立在决策者风险中性假设基础之上的供应链网络均衡的研究成果,实际上,决策者在面临预期收益和损失时往往表现出风险规避的特性,对不确定性风险带来的损失反应会更加强烈.因此,在供应链网络均衡模型中考虑某一决策层级的风险偏好,能够获得更具现实指导意义的结果.文献[11]在电子商务环境下针对由多个制造商、零售商和消费市场构成的供应链网络,建立了相关的网络均衡模型,并考虑到制造商的风险偏好,分析了风险系数对供应链网络均衡的影响.文献[12]进一步深化了文献[11]的研究,假定制造商和零售商同时根据利润最大化和风险最小化原则进行决策,考察了均衡解的变化情况,并设计了不同的算法对均衡问题进行求解.文献[13]基于累计前景理论,将出行者的路径选择决策与网络的随机性相结合,建立了随机网络用户均衡的等价变分不等式模型.尽管上述研究考虑到了供应链网络成员的风险偏好行为,但均是探讨传统供应链网络的均衡问题,没有涉及到闭环供应链模式下的网络均衡决策.

鉴于此,本文在考虑闭环供应链网络均衡特点的基础上,区分已有研究,在零售商具有风险规避特性的条件下,通过有限维变分不等式理论建立相关的变分不等式模型,刻画了闭环供应链网络各层级的最优化行为和整个网络实现均衡的条件.运用拟牛顿算法对问题进行求解,并通过算例分析了随机再制造率和零售商的风险规避程度对闭环供应链网络的影响.

1 问题描述

考虑由 $h(h=1,2,\dots,H)$ 个原材料供应商、 $j(j=1,2,\dots,J)$ 个制造商、 $k(k=1,2,\dots,K)$ 个零售商和 k 个消费市场组成的闭环供应链系统.其中:供应商负责向制造商提供生产所需的原材料;制造商负责产品的生产、回收废旧产品并进行再制造,对于无再制造价值的回收产品送往报废中心进行处理;零售商负责从制造商处批发产品并销售给消费市场.为了方便分析,对模型作如下假设:1)新产品和再制造产品是同质的,消费者对两种产品的接受程度相同;2)闭环供应链网络层级之间的信息结构是对称的,且各层级的决策成员之间为一种非合作的竞争关系;3)除零售商以外,其他成员均为风险中性决策者,且均以实现利润最大化为决策目标;4)各制造商通过投资建立本企业的回收渠道,并在回收价格和数量上展开竞争,消费者愿意返回产品的意愿取决于产品的回收价格;

5)所有成本函数均为连续可微的凸函数.

相关符号定义如下: $q_{hj}^M, q_{jk}^N, q_{kj}^R$ 分别为供应商 h 与制造商 j 之间、制造商 j 与零售商 k 之间和制造商 j 与需求市场 k 之间的交易量,所有交易量组成的列向量对应为 Q^M, Q^N 和 Q^R ; c_{hj}^M 为供应商 h 与制造商 j 之间交易产品产生的交易成本, $c_{hj}^M = c_{hj}^M(Q^M)$; c_{jk}^N 为制造商 j 与零售商 k 之间交易产品产生的交易成本, $c_{jk}^N = c_{jk}^N(Q^N)$; c_{kj}^R 为制造商 j 与消费市场 k 之间交易废旧产品产生的交易成本, $c_{kj}^R = c_{kj}^R(Q^R)$; I_{kj} 和 A_j 分别为制造商 j 对需求市场 k 的回收渠道建设的投资和总投资费用的上界; ρ_{1h}^M 和 ρ_{2j}^N 分别为供应商原材料的批发价格和制造商的产品批发价格, ρ_{3k}^R 和 ρ_{4k}^V 分别为制造商从需求市场 k 回收废旧产品的价格和需求市场 k 的产品销售价格; δ_k 为消费市场 k 中废旧产品的回收率; λ_j^R 为制造商 j 产品的单位报废成本; α_{hj} 为制造商 j 从供应商 h 处采购的原材料的制造率; $\bar{\alpha}_j$ 为制造商 j 对回收的废旧产品的随机再制造率,假设其服从一定的概率分布 $\psi(\alpha_j)$,且满足 $\bar{\alpha}_j = \int \alpha_j d\psi(\alpha_j)$; 对于零售商 k 而言, ϵ^+ 和 ϵ^- 分别为单位库存成本和单位缺货成本, h_k^+ 和 h_k^- 分别为期望库存水平和缺货水平.

2 闭环供应链网络成员行为和各层级网络均衡条件

2.1 供应商行为和网络均衡条件

用 ρ_{1h}^{M*} 表示 ρ_{1h}^M 的均衡值,则供应商 h 实现利润最大化的优化决策模型如下:

$$\begin{aligned} \max \sum_{j=1}^J \rho_{1h}^{M*} q_{hj}^M - f_h^M(Q^M) - \sum_{j=1}^J c_{hj}^M(Q^M); \\ \text{s.t. } q_{hj}^M \geq 0, \forall j. \end{aligned} \quad (1)$$

供应商之间为非合作竞争的 Nash 均衡博弈,所有供应商同时实现最优的条件等价于下述变分不等式:

$$\begin{aligned} \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J \left(-\rho_{1h}^{M*} + \frac{\partial f_h^M(Q^{M*})}{\partial q_{hj}^M} + \frac{\partial c_{hj}^M(Q^{M*})}{\partial q_{hj}^M} \right) \times \\ (q_{hj}^M - q_{hj}^{M*}) \geq 0, \forall Q^M \in R_+^{HJ}. \end{aligned} \quad (2)$$

即求解 $\forall Q^M \in R_+^{HJ}$,使其满足式(2).

2.2 制造商行为和网络均衡条件

用 ρ_{2j}^{N*} 和 ρ_{3k}^{R*} 分别表示 ρ_{2j}^N 和 ρ_{3k}^R 的均衡值,则制造商 j 实现利润最大化的优化决策模型如下:

$$\begin{aligned} \max \sum_{k=1}^K \rho_{2j}^{N*} q_{jk}^N - f_j^N(Q^N) - \sum_{k=1}^K c_{jk}^N(Q^N) - \\ \sum_{k=1}^K c_{kj}^R(Q^R) - \sum_{h=1}^H \rho_{1h}^{M*} q_{hj}^M - \sum_{k=1}^K \rho_{3k}^{R*} q_{kj}^R (I_{kj}) - \end{aligned}$$

$$\sum_{k=1}^K \lambda_j^R (1 - \bar{\alpha}_j) q_{kj}^R (I_{kj}) - \sum_{k=1}^K I_{kj}; \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \sum_{k=1}^K I_{kj} \leq A_j, \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K q_{jk}^N \leq \sum_{h=1}^H \alpha_{hj} q_{hj}^M + \sum_{k=1}^K \bar{\alpha}_j q_{kj}^R (I_{kj}), \quad (5)$$

$$q_{jk}^N, q_{kj}^R, q_{hj}^M, I_{kj} \geq 0, \forall h, k. \quad (6)$$

式(4)和(5)分别为制造商对回收渠道建设投资总额的约束和制造商生产总量的约束. 供应商之间为非合作竞争的Nash均衡博弈, 所有制造商实现最优的条件等价于下述变分不等式:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[-\rho_{2j}^{N*} + \frac{\partial f_j^N(Q^{N*})}{\partial q_{jk}^N} + \frac{\partial c_{jk}^N(Q^{N*})}{\partial q_{jk}^N} + \kappa_j^* \right] \times$$

$$[q_{jk}^N - q_{jk}^{N*}] + \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J [\rho_{1h}^{M*} - \kappa_j^* \alpha_{hj}] [q_{hj}^M - q_{hj}^{M*}] +$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\frac{\partial c_{kj}^R(Q^R)}{\partial q_{kj}^R} \cdot \frac{dq_{kj}^R(I_{kj}^*)}{dI_{kj}} + \right.$$

$$\rho_{3k}^{R*} \cdot \frac{dq_{kj}^R(I_{kj}^*)}{dI_{kj}} + \lambda_j^R (1 - \bar{\alpha}_j) \frac{dq_{kj}^R(I_{kj}^*)}{dI_{kj}} -$$

$$\kappa_j^* \bar{\alpha}_j \frac{dq_{kj}^R(I_{kj}^*)}{dI_{kj}} + 1 + \eta_i^*] [I_{kj} - I_{kj}^*] +$$

$$\sum_{j=1}^J \left[A_j - \sum_{k=1}^K I_{kj}^* \right] [\eta_j - \eta_j^*] + \sum_{j=1}^J \left[\sum_{h=1}^H \alpha_{hj} q_{hj}^{M*} + \right.$$

$$\left. \sum_{k=1}^K \bar{\alpha}_j q_{kj}^R(I_{kj}^*) - \sum_{k=1}^K q_{jk}^{N*} \right] [\kappa_j - \kappa_j^*] \geq 0,$$

$$\forall (Q^M, Q^N, I, \kappa, \eta) \in R_+^{HJ+JK+KJ+J+J}, \quad (7)$$

即求解 $(Q^{M*}, Q^{N*}, I^*, \kappa^*, \eta^*) \in R_+^{HJ+JK+KJ+J+J}$, 使其满足式(7). 其中 η_j 和 κ_j 分别为制造商 j 关于约束(4)和(5)的相关Lagrange乘子.

2.3 零售商行为和网络均衡条件

记 $q_k = \sum_{j=1}^J q_{jk}^N$ 为零售商 k 从制造商处所订的总订货量, $\tilde{d}_k(\rho_{4k}^V)$ 为其产品的随机需求量, 其概率密度函数为 $f_k(x, \rho_{4k}^V)$, 分布函数为 $F_k(x, \rho_{4k}^V) = F_k\{\tilde{d}_k \leq x\} = \int_0^x f_k(x, \rho_{4k}^V) dx$. 所有产品的单位展销成本为总订货量的函数, 记为 $C_k(Q^f)$. 根据文献[14-15], 假设零售商是风险规避型决策者, 且具有分段性的风险规避行为, 即

$$U_k(\pi_k) = \pi_k + (\mu_k - 1) \min\{0, \pi_k\}. \quad (8)$$

其中: π_k 为零售商 k 的期望利润; $\mu_k (\geq 1)$ 为零售商的风险规避系数, 反映决策者对风险的厌恶程度. $\mu_k = 1$ 表示决策者为风险中性, $\mu_k > 1$ 表示决策者是风险规避的, 且 μ_k 越大, 风险规避程度越高.

对于零售商 k 而言, 市场需求量不能超过总订货量 q_k 和需求量 \tilde{d}_k 的最小值 $\min\{q_k, \tilde{d}_k\}$, 令 $\Delta_k^+ = \max\{0, q_k - \tilde{d}_k\}$, $\Delta_k^- = \max\{0, \tilde{d}_k - q_k\}$ 分别为零售商的库存和缺货水平, h_k^+ 和 h_k^- 分别为零售商的期望库存量和期望短缺水平, 则有

$$h_k^+(q_k, \rho_{4k}^V) = E[\Delta_k^+] = \int_0^{q_k} (q_k - x) f_k(x, \rho_{4k}^V) dx, \quad (9)$$

$$h_k^-(q_k, \rho_{4k}^V) = E[\Delta_k^-] = \int_{q_k}^{\infty} (x - q_k) f_k(x, \rho_{4k}^V) dx. \quad (10)$$

用 ρ_{4k}^{V*} 表示 ρ_{4k}^V 的均衡值, 则零售商 k 的期望利润可以表示为

$$\pi_k = E[\rho_{4k}^{V*} \min\{q_k, \tilde{d}_k\}] - E[\varepsilon^+ \Delta_k^+ + \varepsilon^- \Delta_k^-] - C_k(Q^N) - \sum_{j=1}^J \rho_{2j}^{N*} q_{jk}^N. \quad (11)$$

根据文献[14], 使具有风险规避特性的零售商 k 的期望效用最大化的决策优化模型如下:

$$\begin{aligned} \max \pi_k(Q^N) = & \int_0^{q_k} \pi_k dF(x) + \int_{q_k}^{\infty} \pi_k dF(x) + \\ & (\mu_k - 1) \left[\int_0^{\tilde{d}_k(Q^N)} \pi_k dF(x) + \int_{\tilde{d}_k(Q^N)}^{\infty} \pi_k dF(x) \right] = \\ & \pi_k(Q^N) + \omega_k(Q^N). \end{aligned} \quad (12)$$

其中: 右边第1项 $\pi_k(Q^N)$ 为零售商的期望利润; 根据盈亏平衡点的定义, 第2项 $\omega_k(Q^N)$ 是非正的, 表示零售商相对于期望利润的损失偏差, 即风险规避零售商的期望效用不会高于风险中性零售商的期望效用[14-15].

对式(12)进行化简, 得到

$$\begin{aligned} \pi_k(Q^N) = & \rho_{4k}^{V*} q_k - (\rho_{4k}^{V*} + \varepsilon^-) \int_{q_k}^{\infty} (x - q_k) dF(x) - \\ & \varepsilon^+ \int_0^{q_k} (q_k - x) dF(x) - C_k(Q^N) - \sum_{j=1}^J \rho_{2j}^{N*} q_{jk}^N, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \omega_k(Q^N) = & (\mu_k - 1) \left[\int_0^{\tilde{d}_k(Q^N)} (\rho_{4k}^{V*} x - \varepsilon^+(q_k - x) - C_k(Q^N) - \right. \\ & \left. \sum_{j=1}^J \rho_{2j}^{N*} q_{jk}^N) dF(x) + \int_{\tilde{d}_k(Q^N)}^{\infty} (\rho_{4k}^{V*} x - \varepsilon^-(x - q_k) - \right. \\ & \left. C_k(Q^N) - \sum_{j=1}^J \rho_{2j}^{N*} q_{jk}^N) dF(x) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

根据文献[7], 首先给出以下两组表达式:

$$\frac{\partial h_k^+(q_k, \rho_{4k}^{V*})}{\partial q_{jk}^N} = F_k(q_k, \rho_{4k}^{V*}), \quad (15)$$

$$\frac{\partial h_k^-(q_k, \rho_{4k}^{V*})}{\partial q_{jk}^N} = F_k(q_k, \rho_{4k}^{V*}) - 1. \quad (16)$$

零售商之间为非合作竞争的Nash均衡博弈, 所以所有零售商实现最优的条件等价于下述变分不等

式:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[- \left(\rho_{4k}^{V*} - \frac{\partial C_k(Q^{N*})}{\partial q_{jk}^N} - \rho_{2j}^{N*} \right) + \right. \\ & (\rho_{4k}^{V*} + \varepsilon^-) (F_k(q_k, \rho_{4k}^{V*}) - 1) + \\ & \varepsilon^+ F_k(q_k, \rho_{4k}^{V*}) + (\mu_k - 1) \times \\ & \left. \left(\left(\varepsilon^+ + \frac{\partial C_k(Q^{N*})}{\partial q_{jk}^f} + \rho_{2j}^{N*} \right) F_k(d_k(Q^N), \rho_{4k}^{V*}) + \right. \right. \\ & \left. \left(\varepsilon^- + \frac{\partial C_k(Q^{N*})}{\partial q_{jk}^f} + \rho_{2j}^{N*} \right) (F_k(d_k(Q^N), \rho_{4k}^{V*}) - \right. \\ & \left. \left. 1) \right) \right] \times [q_{jk}^N - q_{jk}^{N*}] \geq 0, \forall Q^N \in R_+^{JK}. \quad (17) \end{aligned}$$

即求解 $Q^{N*} \in R_+^{JK}$, 使其满足式(17).

2.4 消费市场行为和网络均衡条件

随机需求下, 类似空间价格均衡的随机均衡条件, 随机需求市场的均衡条件^[3,7,9]为

$$\tilde{d}_k(\rho_{4k}^{V*}) \begin{cases} \leq \sum_{j=1}^J q_{jk}^{N*}, \rho_{4k}^{V*} = 0; \\ = \sum_{j=1}^J q_{jk}^{N*}, \rho_{4k}^{V*} > 0. \end{cases} \quad (18)$$

式(18)表明: 当消费者愿意以 $\rho_{4k}^{b*} > 0$ 的价格从零售商 k 处购买商品时, 零售商 k 从制造商 j 处的采购量等于零售商 k 对制造商 j 处的产品需求量; 当零售商 k 从制造商 j 处的采购量大于需求量时, 零售商 k 产品的销售价格 $\rho_{4k}^{b*} = 0$. 此时, 式(18)中基于随机需求的市场均衡条件等价于下述变分不等式:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^K \left(\sum_{j=1}^J q_{jk}^{N*} - \tilde{d}_k(\rho_{4k}^{V*}) \right) \times [\rho_{4k}^V - \rho_{4k}^{V*}] \geq 0, \\ & \forall \rho_{4k}^V \in R_+^K. \quad (19) \end{aligned}$$

即求解 $\rho_{4k}^{b*} \in R_+^K$, 使其满足式(19).

2.5 逆向供应链网络均衡条件

逆向供应链中, 消费者会根据制造商提供的回收价格和交易成本决定是否将产品返还给制造商. 对于需求市场 k 而言, 均衡条件^[7,9]为

$$\phi_k(Q^R(I^*)) \begin{cases} \geq \rho_{3k}^{R*}, I_{kj}^* = 0, \forall j; \\ = \rho_{3k}^{R*}, I_{kj}^* \geq 0, \forall j. \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^J q_{kj}^R(I_{kj}^*) \leq \delta_k \left(\sum_{j=1}^J q_{jk}^{N*} \right). \quad (21)$$

约束条件(21)表示需求市场 k 废旧产品的回收量不超过总的需求量. ϕ_k 代表顾客退回产品的负效用^[7], 当制造商对回收渠道进行建设投资时, 消费者的负效用得到了弥补. 上述均衡条件等价于下述变分不等式:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\phi_k(Q^R) \frac{dq_{kj}^R(I_{kj}^*)}{dI_{kj}} - \rho_{3k}^{R*} \frac{dq_{kj}^R(I_{kj}^*)}{dI_{kj}} + \right.$$

$$\begin{aligned} & \left. \delta_k^* \frac{dq_{kj}^R(I_{kj}^*)}{dI_{kj}} \right] [I_{kj} - I_{kj}^*] - \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (\delta_k \delta_k^*) [q_{jk}^N - q_{jk}^{N*}] + \\ & \sum_{k=1}^K \left[\delta_k \sum_{j=1}^J q_{kj}^R(I_{kj}^*) \right] [\delta_k - \delta_k^*] \geq 0, \\ & \forall (I_{kj}, q_{jk}^N, \delta_k) \in R_+^{KJ+JK+J}. \quad (22) \end{aligned}$$

即求解 $(I^*, Q^{N*}, \delta^*) \in R_+^{KJ+JK+K}$, 使其满足式(22).

3 闭环供应链网络均衡模型

供应链网络均衡是指供应链网络中各层级之间的交易量和价格同时满足各层级的最优行为和需求市场的均衡条件, 则随机需求和制造商产品再制造率不确定, 且零售商为风险规避决策者的条件下, 闭环供应链网络均衡条件为变分不等式(2), (7), (17), (19), (22)的和.

定理 1 闭环供应链网络在均衡条件下的最优解等价于下列变分不等式的解:

$$\begin{aligned} & \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J \left[\frac{\partial f_h^M(Q^{M*})}{\partial q_{hj}^M} + \frac{\partial c_{hj}^M(Q^{M*})}{\partial q_{hj}^M} - \kappa_j^* \alpha_{hj} \right] \times \\ & [q_{hj}^V - q_{hj}^{V*}] + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\frac{\partial f_j^N(Q^{N*})}{\partial q_{jk}^N} + \frac{\partial c_{jk}^N(Q^{N*})}{\partial q_{jk}^N} + \right. \\ & \left. \kappa_j^* - \rho_{4k}^{V*} + \frac{\partial C_k(Q^{N*})}{\partial q_{jk}^N} + (\rho_{4k}^{V*} + \varepsilon^-) (F_k(q_k, \rho_{4k}^{V*}) - \right. \\ & \left. 1) + \varepsilon^+ F_k(q_k, \rho_{4k}^{V*}) + (\mu_k - 1) \left(\left(\varepsilon^+ + \frac{\partial C_k(Q^{N*})}{\partial q_{jk}^f} + \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \rho_{2j}^{N*} \right) F_k(d_k(Q^N), \rho_{4k}^{V*}) + \left(\varepsilon^- + \frac{\partial C_k(Q^{N*})}{\partial q_{jk}^f} + \rho_{2j}^{N*} \right) \times \right. \\ & \left. \left. (F_k(d_k(Q^N), \rho_{4k}^{V*}) - 1) \right) + \delta_k \delta_k^* \right] [q_{jk}^N - q_{jk}^{N*}] + \\ & \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\frac{\partial c_{kj}^R(Q^R)}{\partial q_{kj}^R} \frac{dq_{kj}^R(I_{kj}^*)}{dI_{kj}} + \rho_{3k}^{R*} \frac{dq_{kj}^R(I_{kj}^*)}{dI_{kj}} + \right. \\ & \left. \lambda_j^R (1 - \bar{\alpha}_j) \frac{dq_{kj}^R(I_{kj}^*)}{dI_{kj}} - \kappa_j^* \bar{\alpha}_j \frac{dq_{kj}^R(I_{kj}^*)}{dI_{kj}} + 1 + \eta_i^* + \right. \\ & \left. \phi_k(Q^R) \frac{dq_{kj}^R(I_{kj}^*)}{dI_{kj}} - \rho_{3k}^{R*} \frac{dq_{kj}^R(I_{kj}^*)}{dI_{kj}} + \delta_k^* \frac{dq_{kj}^R(I_{kj}^*)}{dI_{kj}} \right] \times \\ & [I_{kj} - I_{kj}^*] + \sum_{j=1}^J \left[A_j - \sum_{k=1}^K I_{kj}^* \right] [\eta_j - \eta_j^*] + \\ & \sum_{j=1}^J \left[\sum_{h=1}^H \alpha_{hj} q_{hj}^{M*} + \sum_{k=1}^K \bar{\alpha}_j q_{kj}^R(I_{kj}^*) - \sum_{k=1}^K q_{jk}^{N*} \right] \times \\ & [\kappa_j - \kappa_j^*] + \sum_{k=1}^K \left[\sum_{j=1}^J q_{jk}^{N*} - \tilde{d}_k(\rho_{4k}^{V*}) \right] [\rho_{4k}^V - \rho_{4k}^{V*}] + \\ & \sum_{k=1}^K \left[\delta_k \left(\sum_{j=1}^J q_{kj}^R(I_{kj}^*) \right) \right] [\delta_k - \delta_k^*] \geq 0, \\ & (Q^M, Q^N, I, \kappa, \eta, \rho_4^V, \delta) \in \Omega. \quad (23) \end{aligned}$$

即求解 $(Q^{M*}, Q^{N*}, I^*, \kappa^*, \eta^*, \rho_4^{V*}, \delta^*) \in \Omega$, 使其满足

式(23), 其中 $\Omega \equiv R_+^{HJ+JK+KJ+J+J+K+K}$.

证明 将式(2), (7), (17), (19)和(22)相加, 合并同类项, 即可得证. \square

因为供应商与制造商之间的交易价格 ρ_{1h}^M 、制造商与零售商之间的交易价格 ρ_{2j}^N 和制造商的回收价格 ρ_{3k}^R 均为内生变量, 所以可通过相应的变分不等式求解这些价格变量的均衡值. 若 $q_{hj}^{M*} \geq 0$, 则由式(2)可得

$$\rho_{1h}^{M*} = \frac{\partial f_h^M(Q^{M*})}{\partial q_{hj}^M} + \frac{\partial c_{hj}^M(Q^{M*})}{\partial q_{hj}^M}. \quad (24)$$

若 $q_{jk}^{N*} \geq 0$, 则由式(7)可得到

$$\rho_{2j}^{N*} = \frac{\partial f_j^N(Q^{N*})}{\partial q_{jk}^N} + \frac{\partial c_{jk}^N(Q^{N*})}{\partial q_{jk}^N} + \kappa_j^*. \quad (25)$$

若 $I_{kj}^{R*} \geq 0$, 则由式(22)可得到

$$\rho_{3k}^{R*} = \phi_k(Q^R) + \delta_k^*. \quad (26)$$

对于式(23), 为了方便表示和计算, 利用向量内积的形式将变分不等式表示为

$$F(X)^T(X - X^*) \geq 0, \forall X \in \Omega. \quad (27)$$

其中

$$X \equiv (Q^M, Q^N, I, \kappa, \eta, \rho_4^V, \delta),$$

$$\Omega \equiv \{(Q^M, Q^N, I, \kappa, \eta, \rho_4^V, \delta) | q_{hj}^M \geq 0, q_{jk}^N \geq 0,$$

$$I_j \geq 0, \kappa_j \geq 0, \eta_j \geq 0, \rho_{4k}^V \geq 0, \delta_k \geq 0, \forall h, j, k\}.$$

$F(X)$ 的每一个分量的具体形式由式(23)中乘法符号的前面部分构成, 且有

$$F(X) = \{F_{hj}^1, F_{jk}^2, F_{kj}^3, F_j^4, F_j^5, F_k^6, F_k^7\}_{h=1,2,\dots,H, j=1,2,\dots,J, k=1,2,\dots,K},$$

其中 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 为 N 维欧氏空间内积.

4 数值算例

均衡约束数学规划问题的求解方法较多, 本文采用拟牛顿算法^[16]对变分不等式进行求解. 考虑由2个供应商、2个制造商、2个零售商和2个需求市场组成的闭环供应链网络. 原材料供应商的采购成本为

$$f_h^M(Q^M) = 4\left(\sum_{j=1}^2 q_{hj}\right)^2 + 2\left(\sum_{j=1}^2 q_{hj}\right) + 1,$$

$$h, j = 1, 2.$$

制造商的生产成本为

$$f_j^N(Q^N) = \left(\sum_{k=1}^2 q_{jk}\right)^2 + 2\left(\sum_{k=1}^2 q_{jk}^N\right) + 1,$$

$$j, k = 1, 2.$$

废旧产品回收量关于回收渠道的投资为

$$q_{kj}^R(I_{kj}) = 5.5I_{kj}, j, k = 1, 2.$$

不同决策层级之间的交易成本函数分别为

$$c_{hj}^M(Q^M) = 0.5\left(\sum_{j=1}^2 q_{hj}\right)^2,$$

$$c_{jk}^N(Q^N) = 1.5\left(\sum_{k=1}^2 q_{jk}\right)^2,$$

$$c_{kj}^R(Q^R) = \left(\sum_{j=1}^2 q_{kj}^R(I_{kj})\right)^2, h, j, k = 1, 2.$$

零售商的展销成本为

$$C_k(Q^N) = 2\left(\sum_{j=1}^2 q_{jk}^N\right)^2.$$

消费者的负效用函数为

$$\phi_k(Q^R(I)) = 0.5\left(\sum_{j=1}^2 q_{kj}^R\right)^2 + 2.5, j, k = 1, 2.$$

其他参数赋值如下: $\alpha_{hj} = 0.8, \lambda_j^R = 0.5, \delta_k = 0.65, \varepsilon^+ = \varepsilon^- = 1$. 不失一般性, 假设随机市场需求函数服从均匀分布, 分布区间为 $[0, (b_k/\rho_{4k}^V)]$, 则有

$$F_k(x, \rho_{4k}^V) = x\rho_{4k}^V/b_k, f_k(x, \rho_{4k}) = \rho_{4k}^V/b_k,$$

$$d_k(\rho_{4k}^V) = E(\tilde{d}_k) = b_k/2\rho_{4k}^V.$$

给定初值

$$I_{kj}^0 = \eta_i^0 = \kappa_j^0 = \rho_{4k}^{V0} = 50, q_{hj}^{M0} = q_{jk}^{N0} = 100.$$

算法程序通过 Matlab 7.0 实现, 步长设定为常数 0.001, 收敛标准为两次迭代的差的绝对值不超过 10^{-5} . 根据具体计算结果, 下面分析随机再制造率和零售商的风险规避程度对网络均衡结果的影响.

图1为产品流量随期望再制造率变化趋势. 由图1可见, 当制造商提高废旧产品的期望再制造率时, 制造商的产品生产总量和回收量均实现增加. 这是因为随着期望再制造率的提高, 制造商能从废旧产品的再制造中获得更多的利益, 因此会增加对回收渠道建设的投资, 从而实现了回收量的增加, 回收量增加也在一定程度上提高了产品的生产量. 另一方面, 产品总生产量的增加速度要快于回收量的增加速度. 这主要是由于产量所引起的需求增加的速度要快于回收量提高所引起的需求增加速度, 在市场需求未完全满足之前, 制造商必然会提高原材料的采购量, 生产更多的产品, 从而提高企业利润.

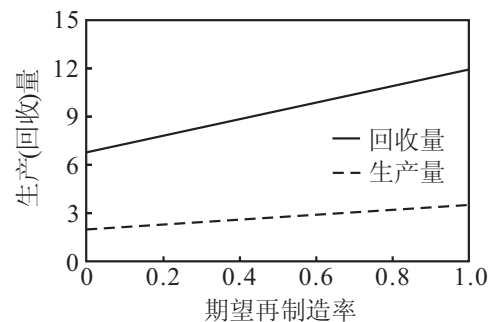


图1 产品流量随期望再制造率变化趋势

图2为网络成员利润随期望再制造率变化趋势. 由图2可见, 随着制造商废旧产品期望再制造率的提高, 供应商的利润先增后降, 制造商和零售商的利润均增加, 闭环供应链总利润增加. 这主要是因为制造商再制造率的提高会相应地减少对供应商原材料的采购, 当再制造率达到一定的值时, 供应商的利润出现下降. 对于制造商和零售商而言, 再制造率的提高会导致产品总生产量的增加, 当市场需求未饱和之前, 零售商也会相应地增加产品的订购量, 因此制造商和零售商的利润均会实现增加. 同时, 闭环供应链的总利润随着期望再制造率的增加而增加, 表明再制造对于整个闭环供应链而言是有利的.

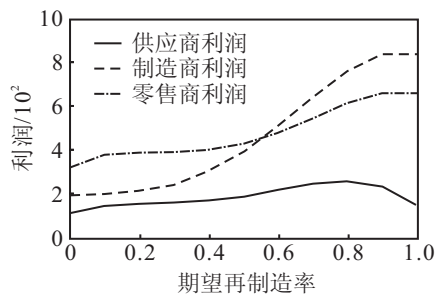


图2 网络成员利润随期望再制造率变化趋势

表1为零售商风险规避程度相同时的均衡决策结果. 由表1可见: 1) 零售商的风险规避程度越大, 订货量便越少, 产品需求价格相应上升, 这主要是由于零售商为了规避产品过剩和短缺带来的损失, 需要降低订货量, 市场上商品的供应量降低, 需求价格从而升高. 2) 废旧产品的回收价格随零售商风险规避程度的增加而增加, 该结论不太直观, 主要是因为制造商能从废旧产品的回收再制造中获取更多的利润, 因此有回收产品的积极性. 零售商风险规避程度增加, 会相应地减少订货量, 制造商从批发产品中所获得的收益降低, 但此时制造商通过加大对回收渠道的建设投资, 提高了废旧产品的回收价格, 从而使回收量实现了增加. 3) 零售商风险规避程度升高, 制造商购买原材料的价格上升, 制造商产品批发价格成微幅下降趋势. 这主要是由于零售商订货量减少, 导致制造商对

表1 零售商风险规避程度相同时的均衡决策结果

变量	$\mu_i = 1$	$\mu_i = 2$	$\mu_i = 3$	$\mu_i = 4$
ρ_{1h}^{M*}	40.1523	42.6014	45.1589	50.4308
ρ_{2j}^{N*}	61.5189	60.7546	59.0900	58.4602
ρ_{3k}^{R*}	13.0423	13.5239	13.8302	14.0070
ρ_{4k}^{V*}	87.8902	91.6131	96.1495	100.0328
q_{hj}^{M*}	19.8005	18.9430	18.2183	17.0214
q_{jk}^{N*}	10.0711	9.5294	8.9091	8.2247
q_{kj}^{R*}	2.8824	2.8025	2.9206	2.9408
I_{kj}^*	27.0402	26.8220	27.0911	27.9896

原材料的需求量也随之降低, 故原材料购买价格上升; 另一方面, 零售商降低订货量给制造商带来的损失通过废旧产品的回收再制造得到了弥补, 所以制造商的产品批发价格微幅下降.

表2为零售商风险规避程度不同时的均衡决策结果. 由表2可见: 1) 风险中性零售商的订货量高于风险规避的零售商, 且随着规避程度的增大, 差异也越明显, 这是因为风险中性零售商对产品过剩和短缺带来的损失的敏感程度要低于风险规避者, 所以订货量高于对方; 2) 随着零售商风险规避程度的增加, 风险中性零售商的订货量微幅增加, 产品的销售价格降低, 这主要是由于风险规避零售商减少对市场的供应量, 导致其他风险中性的零售商为了获得更多的销售利润, 会相应地增加订货量和降低产品的销售价格.

表2 零售商风险规避程度不同时的均衡决策结果

变量	$\mu_1 = 1$			
	$\mu_2 = 1$	$\mu_2 = 2$	$\mu_2 = 3$	$\mu_2 = 4$
ρ_{1h}^{M*}	40.1523	41.5537	42.8049	44.3936
ρ_{2j}^{N*}	61.5189	$\begin{bmatrix} 61.0770 \\ 60.9250 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 59.8041 \\ 58.7509 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 59.3020 \\ 57.9731 \end{bmatrix}$
ρ_{3k}^{R*}	13.0423	$\begin{bmatrix} 12.9550 \\ 13.8179 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 12.5800 \\ 14.5721 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 12.2630 \\ 15.3906 \end{bmatrix}$
ρ_{4k}^{V*}	87.8902	$\begin{bmatrix} 87.0059 \\ 88.7963 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 86.5249 \\ 90.0122 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 85.8993 \\ 92.4064 \end{bmatrix}$
q_{hj}^{M*}	19.8005	19.0208	18.7529	18.0056
q_{jk}^{N*}	10.0711	$\begin{bmatrix} 10.2650 \\ 9.8063 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 10.5001 \\ 9.3322 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 10.8989 \\ 8.7215 \end{bmatrix}$
q_{kj}^{R*}	2.8824	$\begin{bmatrix} 2.9260 \\ 2.8901 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2.9600 \\ 2.9036 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.0014 \\ 2.9340 \end{bmatrix}$
I_{kj}^*	27.0402	$\begin{bmatrix} 27.0620 \\ 27.3346 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 27.2599 \\ 27.7600 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 27.5688 \\ 28.0250 \end{bmatrix}$

5 结 论

本文在随机需求条件下, 针对具有风险规避特性的零售商, 利用均衡理论和变分不等式理论对再制造闭环供应链网络均衡决策进行了研究. 通过对闭环供应链网络不同决策层级最优化行为的分析, 分别得到了各层级和整个网络实现均衡的条件, 并在此基础上建立了相关的变分不等式模型. 进一步利用拟牛顿算法对变分问题进行求解, 并仿真分析了制造商的随机再制造率和零售商的风险规避程度对网络成员最优行为和网络均衡的影响. 相关结论对闭环供应链网络企业的定价和再制造决策提供了一定的借鉴作用.

以下两个方面还有待进一步研究: 1) 在决策成员之间信息不对称的条件下研究闭环供应链网络均衡问题; 2) 将消费者对新产品和再制造产品的偏好考虑到均衡模型中, 从而使研究更具现实意义.

参考文献(References)

- [1] Nagurney A, Dong J, Zhang D. A supply chain network equilibrium model[J]. *Trans Research Part E*, 2002, 38(5): 281-303.
- [2] 滕春贤, 胡引霞, 周艳山. 具有随机需求的供应链网络均衡应对突发事件[J]. *系统工程理论与实践*, 2009, 29(3): 16-20.
(Teng C X, Hu Y X, Zhou Y S. Supply chain network equilibrium with stochastic demand under disruptions[J]. *System Engineering-Theory & Practice*, 2009, 29(3): 16-20.)
- [3] 胡劲松, 徐元吉, 刘芳霞, 等. 具有模糊需求的多商品流供应链网络均衡研究[J]. *控制与决策*, 2012, 27(5): 665-672.
(Hu J S, Xu Y J, Liu F X, et al. Multi-products flow supply chain network equilibrium with fuzzy demand[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(5): 665-672.)
- [4] Nagurney A, Nagerney L S. Dynamics and equilibria of ecological predator-prey networks as nature's supply chains[J]. *Trans Research Part E*, 2012, 48(1): 89-99.
- [5] Nagurney A. Reverse supply chain management and electronic waste recycling: A multitiered network equilibrium framework for e-cycling[J]. *Trans Research Part E*, 2005, 41(5): 1-28.
- [6] Hammond D, Beullens P. Closed-loop supply chain network equilibrium under legislation[J]. *European J of Operational Research*, 2007, 183(2): 895-908.
- [7] Qiang Q, Ke K, Anderson T, et al. The closed-loop supply chain network with competition, distribution channel investment, and uncertainties[J]. *Omega*, 2013, 41(2): 186-194.
- [8] 杨玉香, 周根贵. 闭环供应链网络设施竞争选址模型研究[J]. *中国管理科学*, 2011, 19(5): 50-57.
(Yang Y X, Zhou G G. Study on location model of facility competition for closed-loop supply chain network[J]. *Chinese J of Management Science*, 2011, 19(5): 50-57.)
- [9] 杨玉香, 周根贵. 随机需求下闭环供应链网络设施竞争选址模型研究[J]. *控制与决策*, 2011, 26(10): 1553-1561.
(Yang Y X, Zhou G G. Study on location model of facility competition for closed-loop supply chain network with random demands[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(10): 1553-1561.)
- [10] Yang G F, Wang Z P, Li X Q. The optimization of the closed-loop supply chain network[J]. *Trans Research Part E*, 2009, 45(1): 16-28.
- [11] Nagurney A, Cruz J, Dong J, et al. Supply chain networks, electronic commerce, and supply side and demand side risk[J]. *European J of Operational Research*, 2005, 164(1): 120-142.
- [12] Zhang L P, Zhou Y. A new approach to supply chain network equilibrium models[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2012, 63(1): 82-88.
- [13] 徐红利, 周晶, 徐薇. 基于累积前景理论的随机网络用户均衡模型[J]. *管理科学学报*, 2011, 14(7): 1-7.
(Xu H L, Zhou J, Xu W. Cumulative prospect theory-based user equilibrium model for stochastic network[J]. *J of Management Sciences in China*, 2011, 14(7): 1-7.)
- [14] 沈厚才, 徐进, 庞湛. 损失规避偏好下的定制件采购决策分析[J]. *管理科学学报*, 2004, 7(6): 37-45.
(Shen H C, Xu J, Pang Z. Decision analysis for order-specific component procurement with loss-averse utility[J]. *J of Management Sciences in China*, 2004, 7(6): 37-45.)
- [15] Agrawal V, Seshadri S. Risk intermediation in supply chains[J]. *IIE Trans*, 2000, 32(9): 819-831.
- [16] Meng Q, Huang Y K, Cheu R L. A note on supply chain network equilibrium models[J]. *Trans Research Part E*, 2007, 43(1): 60-71.

(责任编辑: 郑晓蕾)