文章编号: 1001-0920 (2011) 10-1553-09

随机需求下闭环供应链网络设施竞争选址模型研究

杨玉香[1,2], 周根贵[1]

(1. 浙江工业大学 经贸管理学院，杭州 310014；2. 中国计量学院 经济与管理学院，杭州 310018)

摘 要: 利用均衡理论和变分不等式研究工具, 建立了随机需求情形下多层竞争型闭环供应链网络均衡模型, 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. 利用均衡模型来捕捉由新进设施的进入所引起的网络均衡状态的变化, 并将其引入位置决策过程. 根据模型特点, 提出了遗传算法与修正投影算法相结合的求解策略. 最后利用提出的模型和求解算法对算例进行计算与分析, 得到了网络竞争趋势变化情况、新设施的位置策略及其生产运营决策.

关键词: 闭环供应链网络；均衡模型；设施竞争；均衡约束数学规划

中图分类号: F224；F270 **文献标识码:** A

Study on location model of facility competition for closed-loop supply chain network with random demands

YANG Yu-xiang[1,2], *ZHOU Gen-gui*[1]

(1. School of Business Administration，Zhejiang University of Technology，Hangzhou 310014，China；2. College of Economics and Management，China Jiliang University，Hangzhou 310018，China. Correspondent：ZHOU Gen-gui，E-mail：ggzhou@zjut.edu.cn)

Abstract: By using the methods of equilibrium theory and variational inequality, a multi-tiers competitive closed-loop supply chain network equilibrium model with random demands is proposed. Based on this model, a mathematical program with equilibrium constraints for the location model of facility competition is developed. The equilibrium model is used to capture the change of equilibrium state for the network resulting from the entering facilities, and incorporate the effect of changes directly into the location decision model. According to the characteristic of the model, a solution method of integrating the genetic algorithm and the modified projection method is built to solve the problem. Finally, numerical examples are solved and analyzed by using the proposed model and algorithm, the station of competitive developing trends for the network, and the location decision for the entering facilites and the manufacturing and operation decision are obtained.

Key words: closed loop supply chain network；equilibrium model；facilities competition；mathematical program with equilibrium constraints

1 引 言

目前, 对于闭环供应链网络设施选址问题已进行了大量研究, 其模型可分为以下两类: 一类是确定环境模型. 文献 [1] 考虑正向和逆向分销的整合, 建立了整数规划模型, 并以影印机再制造和纸再循环作为案例进行分析; [2] 提出了废电池的闭环供应链, 建立了两阶段设施位置优化模型; [3] 提出了多产品、有能力限制的混合整数线性规划模型来优化设计再制造闭环物流网络. 另一类是随机环境模型. [4] 通过使用 Monto Carlo 模拟技术求解在需求和回收产品数量不确定条件下非线性混合整数规划问题, 确定了分销中心与回收中心的选址与流量分配; [5] 建立了包含正向与逆向物流网络的多周期多阶段随机整数线性规划模型来决策设施的位置、运输路线及设施间产品流量. 以上文献均假设新进入的企业是空间垄断者, 它提供特定产品或服务, 且是价格制定者, 市场上不存在竞争. 但是, 实际上新企业的进入必然与市场上的竞争对手竞争市场份额, 且商品的价格由市场供需决定, 在新企业进入之前, 该行业商品供求是平衡的, 已达到均衡状态, 新企业进入之后必将打破原有

收稿日期: 2010-06-24；**修回日期:** 2010-12-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71071142)；“浙江省高校人文社科重点研究基地——标准化与知识产权管理”资助.

作者简介: 杨玉香(1979−), 女, 讲师, 从事供应链管理、逆向物流的研究；周根贵(1958−), 男, 教授, 博士生导师, 从事供应链管理、多目标决策与评价等研究.

均衡, 形成新的市场均衡价格、产品交易量和产品生产量, 达到新的均衡状态, 因此原有的基于垄断企业设计的位置策略会因为竞争的影响而失效. 然而, 对于考虑竞争设施选址问题的研究还非常有限, [6] 提出古诺-纳什寡占模型决策生产设施的位置和生产水平. [7-8] 进一步推广上述模型, 认为新进企业不仅决定生产水平和位置, 还决定运输模式, 并给出基于灵敏度分析的混合算法. 但以上模型潜在的均衡问题都只是空间价格均衡, 且仅考虑了产品的正向流.

近年来, 对于供应链网络均衡模型的研究已成为热点问题, 其主要研究工具是均衡理论和变分不等式, 实现了从独立决策到交互式决策的转变. 文献 [9] 研究了 Nash 均衡、变分不等式及动态均衡的关系. [10] 详细分析了 Nash 均衡、变分不等式和广义均衡问题间的联系, 并给出了这些问题解的关系. [11] 建立了含有制造商、零售商和需求市场 3 层网络均衡模型, 分析不同决策者的独立行为及其相互影响的竞争行为, 给出了系统均衡条件, 利用实例分析网络交易价格和交易流量的确定, 此模型为确定环境下的模型. 针对需求随机性, [12] 建立了需求随机条件下针对单产品情形包括制造商和零售商的网络均衡模型. 可见, 均衡理论对供应链网络的研究已有一定的基础且具有广泛的应用前景.

本文利用均衡理论和变分不等式研究工具建立随机需求闭环供应链网络均衡模型, 并以此为基础建立带有均衡约束的设施竞争选址模型, 以决策进入设施的位置、产品生产量、设施间产品交易量和交易价格, 并给出模型求解算法和具体算例.

2 闭环供应链网络设施竞争选址模型

2.1 建模准备

设某市场现有的闭环供应链网络由制造/再制造工厂、分销/回收中心、零售商/回收点和需求市场组成. 考虑有 $H(h=1,2,\cdots,H)$ 个工厂生产同质无差异产品, 回收、制造/再制造一种产品, 且再制造产品与新产品无区别. 生产的产品销往 $I(i=1,2,\cdots,I)$ 个分销中心, 供给 $J(j=1,2,\cdots,J)$ 个零售商, 每个零售商服务于所在需求区域的顾客. 各个需求区域的报废 (EOL) 产品通过回收点进行回收, 然后运往回收中心进行处理, 最后将其运往工厂进行再制造. 假设同层的决策者间为非合作竞争关系, 每个决策者均以利润最大化为目标.

现有一个大型企业要进入该市场, 准备在 G 个备选地址中选择 K 个地址建立制造/再制造工厂, 在 S 个备选地址中选择 W 个地址建立分销/回收中心. 假设新进企业足够大以至于可以影响市场价格, 这样, 新企业的进入将引起市场供给的增加, 新企业与其竞争对手竞争市场份额, 导致网络间产品流量、产品生产量及市场均衡价格发生变化. 设新进企业在作最优选址决策前可以预测到竞争市场的反应, 即新进企业可预测到在其新设施加入该市场原有供应链网络后形成的新网络中各层决策者间的交易和价格模式.

新进企业通过分析自己的选址决策对竞争市场的影响来决策开设各设施的位置、产品生产量、交易量和价格. 新进企业首先做选址决策, 每一组潜在选址决策内的设施均会作为此区域市场的新成员与竞争对手的设施形成新网络, 此时的供应链网络中各决策者间构成新的非合作竞争关系. 新进企业根据第一步的决策行动, 可以预测到新网络中各个决策者的反应, 即以各自利润最大化为目标作出产品生产量、交易量和交易价格的决策. 新进企业根据新网络中决策者的反应进一步做选址决策, 最终得到具有竞争优势的选址策略. 因而, 这一选址决策模型可看作以新进企业为主方、新网络中成员为从方的一主多从 Stackelberg 对策问题.

引入如下符号: 决策变量 $U_h(h\in\{H+1,H+2,\cdots,H+G\})$ 为 0-1 变量, 表示是否选择备选地址 h 开设工厂, 0 为不选, 1 为选中; $V_i(i\in\{I+1,I+2,\cdots,I+S\})$ 为 0-1 变量, 表示是否选择备选地址 i 开设分销/回收中心, 0 为不选, 1 为选中; $q_h^{\rm NEW}$ 为工厂 h 生产新产品数量, 所有工厂的新产品数量组成列向量 $q^{\rm NEW}$; q_{hi}^N 为工厂 h 与分销中心 i 间产品总交易量, 所有交易量组成列向量 Q^1; q_{ih}^R 为工厂 h 与回收中心 i 间 EOL 产品交易量, 所有交易量组成列向量 Q^2; ρ_{hi}^N 为工厂 h 对售往分销中心 i 单位产品索价; ρ_{ih}^R 为回收中心 i 对售往工厂 h 单位 EOL 产品索价; q_{ij}^N 为分销中心 i 与零售商 j 间产品总交易量, 所有交易量组成列向量 Q^3; q_{ji}^R 为回收中心 i 与回收点 j 间 EOL 产品交易量, 所有交易量组成列向量 Q^4; ρ_{ij}^N 为分销中心 i 对售往零售商 j 单位产品索价; ρ_{ji}^R 为回收点 j 对售往回收中心 i 单位 EOL 产品索价; ρ_j^N 为零售商 j 对需求市场单位产品销售价格, 所有价格组成列向量 ρ_1; ρ_j^R 为回收点 j 从需求市场回收单位 EOL 产品价格, 所有价格组成列向量 ρ_2; q_j^R 为回收点 j 处需求市场 EOL 产品供给量, 所有供给量组成列向量 q^R.

相关参数如下: TR_h: $h\in\{H+1,H+2,\cdots,H+G\}$ 为开设工厂 h 的固定成本; TT_i: $i\in\{I+1,I+2,\cdots,I+S\}$ 为开设分销/回收中心 i 的固定成本; f_h^N 为工厂 h 生产新产品成本函数, 令 $f_h^N=f_h^N(q^{\rm NEW})$; f_h^R 为工厂 h 生产再制造产品成本函数, 假定 $f_h^R=f_h^R(Q^2)$; c_{hi}^N 为由工厂 h 与分销中心 i 交易产品引起的交易成本, 且 $c_{hi}^N=c_{hi}^N(q_{hi}^N)$; c_{ih}^R 为由工厂 h 与回收中心 i 交易 EOL 产品引起的交易成本, 且 $c_{ih}^R=c_{ih}^R(q_{ih}^R)$;

b 为单位 EOL 产品处理成本; β 为 EOL 产品再制造比率; α 为环境部门规定的工厂 EOL 产品的最低回收率; f_i^N 为分销中心 i 的产品处理成本函数, 且 $f_i^N = f_i^N(Q^1)$; f_i^R 为回收中心 i 的 EOL 产品处理成本函数, 且 $f_i^R = f_i^R(Q^2)$; $\hat{c}_{hi}^N$ 为由分销中心 i 与工厂 h 交易产品引起的交易成本, 且 $\hat{c}_{hi}^N = \hat{c}_{hi}^N(q_{hi}^N)$; $\hat{c}_{ih}^R$ 为由回收中心 i 与工厂 h 交易 EOL 产品引起的交易成本, 且 $\hat{c}_{ih}^R = \hat{c}_{ih}^R(q_{ih}^R)$; c_{ij}^N 为由分销中心 i 与零售点 j 交易产品引起的交易成本, 且 $c_{ij}^N = c_{ij}^N(q_{ij}^N)$; c_{ji}^R 为由回收中心 i 与回收点 j 交易 EOL 产品引起的交易成本, 且 $c_{ji}^R = c_{ji}^R(q_{ji}^R)$; f_j^N 为零售商 j 的产品处理成本, 且 $f_j^N = f_j^N(Q^3)$; $\hat{c}_{ij}^N$ 为由零售商 j 与分销中心 i 交易产品引起的交易成本, 且 $\hat{c}_{ij}^N = \hat{c}_{ij}^N(q_{ij}^N)$; $\hat{c}_{ji}^R$ 为由回收点 j 与回收中心 i 交易 EOL 产品引起的交易成本, 且 $\hat{c}_{ji}^R = \hat{c}_{ji}^R(q_{ji}^R)$; f_j^R 为回收点 j 的 EOL 产品的处理成本, 且 $f_j^R = f_j^R(Q^4)$; $\hat{c}_j^R$ 为需求市场的消费者与回收点 j 的交易成本, 且 $\hat{c}_j^R = \hat{c}_j^R(q_j^R)$.

2.2 模型建立

2.2.1 随机需求闭环供应链网络均衡模型

使用均衡理论和变分不等式研究工具来分析新进企业每一组潜在选址决策对应的设施与原有设施形成的新网络中各个决策者的竞争行为及其相互作用, 利用均衡模型得到使各自利润最大化的产品生产量、设施间产品交易量和交易价格的均衡值.

1) 对于工厂 h, 其目标是实现利润最大化, 设 ρ_{hi}^{N*} 和 ρ_{ih}^{R*} 分别表示 ρ_{hi}^N 和 ρ_{ih}^R 的均衡值, 则优化模型为

$$\max \sum_{i\in\Omega(V)} \rho_{hi}^{N*} q_{hi}^N - f_h^N(q^{\mathrm{NEW}}) - \sum_{i\in\Omega(V)} c_{hi}^N(q_{hi}^N) - f_h^R(Q^2) - \sum_{i\in\Omega(V)} c_{ih}^R(q_{ih}^R) - \sum_{i\in\Omega(V)} \rho_{ih}^{R*} q_{ih}^R - b\sum_{i\in\Omega(V)} q_{ih}^R; \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \sum_{i\in\Omega(V)} q_{hi}^N \leqslant q_h^{\mathrm{NEW}} + \beta \sum_{i\in\Omega(V)} q_{ih}^R, \tag{2}$$

$$\alpha \sum_{i\in\Omega(V)} q_{hi}^N \leqslant \sum_{i\in\Omega(V)} q_{ih}^R, \tag{3}$$

$$q_h^{\mathrm{NEW}}, q_{hi}^N, q_{ih}^R \geqslant 0,\ \forall i\in\Omega(V). \tag{4}$$

其中

$$\Omega(V) = \{1,2,\cdots,I\} \bigcup \Theta(V),$$

$$\Theta(V) = \{i|V_i = 1,\ i = I+1, I+2,\cdots, I+S\},$$

分别对应 $V_i = 1$ 的 W 个分销/回收中心; 式 (1) 为工厂 h 的利润; 式 (2) 表示工厂 h 的总交易量不会大于新产品和再制造产品总生产量; 式 (3) 为工厂 h 的回收量限制; 式 (4) 为变量的非负限制.

假设所有成本函数均为连续可微凸函数, 则由于所有工厂为非合作竞争关系, 根据 Nash 均衡概念, 所有制造商同时最优的条件可以表示为如下变分不等式[13-14], 即求解

$$(q^{\mathrm{NEW}*}, Q^{1*}, Q^{2*}, \lambda_1^*, \lambda_2^*) \in R_+^{2(H+K)(I+W)+3(H+K)},$$

使其满足

$$\sum_{h\in\Phi(U)} \left[\frac{\partial f_h^N(q^{\mathrm{NEW}*})}{\partial q_h^{\mathrm{NEW}}} - \lambda_{1h}^*\right] \times [q_h^{\mathrm{NEW}} - q_h^{\mathrm{NEW}*}] + \sum_{h\in\Phi(U)} \sum_{i\in\Omega(V)} \left[\frac{\partial c_{hi}^N(q_{hi}^{N*})}{\partial q_{hi}^N} + \lambda_{1h}^* + \alpha\lambda_{2h}^* - \rho_{hi}^{N*}\right] \times [q_{hi}^N - q_{hi}^{N*}] + \sum_{h\in\Phi(U)} \sum_{i\in\Omega(V)} \left[\frac{\partial c_{ih}^R(q_{ih}^{R*})}{\partial q_{ih}^R} + \rho_{ih}^{R*} + \frac{\partial f_h^R(Q^{2*})}{\partial q_{ih}^R} + b - \beta\lambda_{1h}^* - \lambda_{2h}^*\right] \times [q_{ih}^R - q_{ih}^{R*}] + \sum_{h\in\Phi(U)} \left[q_h^{\mathrm{NEW}*} + \beta \sum_{i\in\Omega(V)} q_{ih}^{R*} - \sum_{i\in\Omega(V)} q_{hi}^{N*}\right] \times [\lambda_{1h} - \lambda_{1h}^*] + \sum_{h\in\Phi(U)} \left[\sum_{i\in\Omega(V)} q_{ih}^{R*} - \alpha \sum_{i\in\Omega(V)} q_{hi}^{N*}\right] \times [\lambda_{2h} - \lambda_{2h}^*] \geqslant 0,$$
$$\forall (q^{\mathrm{NEW}}, Q^1, Q^2, \lambda_1, \lambda_2) \in R_+^{2(H+K)(I+W)+3(H+K)}. \tag{5}$$

其中: $\Phi(U) = \{1,2,\cdots,H\} \bigcup \Gamma(U)$ 和 $\Gamma(U) = \{h|U_h = 1,\ h = H+1, H+2,\cdots, H+G\}$ 分别对应 $U_h = 1$ 的 K 个工厂; $\lambda_1 = [\lambda_{11}\ \ \lambda_{12}\ \ \cdots\ \ \lambda_{1(H+K)}]^{\mathrm{T}}$ 和 $\lambda_2 = [\lambda_{21}\ \ \lambda_{22}\ \ \cdots\ \ \lambda_{2(H+K)}]^{\mathrm{T}}$ 分别为 $H+K$ 个工厂关于约束 (2) 和 (3) 相关的 Lagrange 乘子.

2) 对于分销/回收中心 i, 分销中心要从工厂购入产品, 还要将产品销售给零售商, 回收中心要从回收点回收 EOL 产品, 同时将 EOL 产品销往工厂. 设 ρ_{ij}^{N*} 和 ρ_{ji}^{R*} 分别表示 ρ_{ij}^N 和 ρ_{ji}^R 的均衡值, 则分销/回收中心 i 利润最大化的优化模型为

$$\max \sum_{j\in\Psi} \rho_{ij}^{N*} q_{ij}^N + \sum_{h\in\Phi(U)} \rho_{ih}^{R*} q_{ih}^R - \sum_{h\in\Phi(U)} \rho_{hi}^{N*} q_{hi}^N - \sum_{j\in\Psi} \rho_{ji}^{R*} q_{ji}^R - f_i^N(Q^1) - f_i^R(Q^2) - \sum_{j\in\Psi} c_{ij}^N(q_{ij}^N) - \sum_{j\in\Psi} c_{ji}^R(q_{ji}^R) - \sum_{h\in\Phi(U)} \hat{c}_{hi}^N(q_{hi}^N) - \sum_{h\in\Phi(U)} \hat{c}_{ih}^R(q_{ih}^R); \tag{6}$$

$$\text{s.t.} \sum_{j\in\Psi} q_{ij}^N \leqslant \sum_{h\in\Phi(U)} q_{hi}^N, \tag{7}$$

$$\sum_{h\in\Phi(U)} q_{ih}^R \leqslant \sum_{j\in\Psi} q_{ji}^R, \tag{8}$$

$$q_{hi}^N, q_{ih}^R, q_{ij}^N, q_{ji}^R \geqslant 0,\ \forall h\in\Phi(U),\ \forall j\in\Psi. \tag{9}$$

$\Psi = \{1,2,\cdots,J\}$; 式 (6) 为分销/回收中心 i 的利润; 式 (7) 表示分销中心 i 与所有零售商的总交易量不会大于从工厂总接收量; 式 (8) 表示回收中心 i 与所有工厂 EOL 产品交易量不会大于总回收量; 式 (9) 为变量非负限制.

同样假设所有成本函数均为连续可微凸函数, 所有分销/回收中心, 同时最优的条件和下列变分不等式的解是一致的, 即求解 $(Q^{1*},Q^{2*},Q^{3*},Q^{4*},\lambda_3^*,\lambda_4^*)\in R_+^{2(H+K)(I+W)+2(I+W)J+2(I+W)}$, 使其满足

$$\sum_{h\in\Phi(U)}\sum_{i\in\Omega(V)}\Big[\frac{\partial f_i^N(Q^{1*})}{\partial q_{hi}^N}+\rho_{hi}^{N*}+\frac{\partial\hat{c}_{hi}^N(q_{hi}^{N*})}{\partial q_{hi}^N}-\lambda_{3i}^*\Big]\times[q_{hi}^N-q_{hi}^{N*}]+\sum_{h\in\Phi(U)}\sum_{i\in\Omega(V)}\Big[\frac{\partial f_i^R(Q^{2*})}{\partial q_{ih}^R}+\frac{\partial\hat{c}_{ih}^R(q_{ih}^{R*})}{\partial q_{ih}^R}+\lambda_{4i}^*-\rho_{ih}^{R*}\Big]\times[q_{ih}^R-q_{ih}^{R*}]+$$
$$\sum_{i\in\Omega(V)}\sum_{j\in\Psi}\Big[\frac{\partial c_{ij}^N(q_{ij}^{N*})}{\partial q_{ij}^N}+\lambda_{3i}^*-\rho_{ij}^{N*}\Big]\times[q_{ij}^N-q_{ij}^{N*}]+\sum_{i\in\Omega(V)}\sum_{j\in\Psi}\Big[\frac{\partial c_{ji}^R(q_{ji}^{R*})}{\partial q_{ji}^R}+\rho_{ji}^{R*}-\lambda_{4i}^*\Big]\times[q_{ji}^R-q_{ji}^{R*}]+$$
$$\sum_{i\in\Omega(V)}\Big[\sum_{h\in\Phi(U)}q_{hi}^{N*}-\sum_{j\in\Psi}q_{ij}^{N*}\Big]\times[\lambda_{3i}-\lambda_{3i}^*]+\sum_{i\in\Omega(V)}\Big[\sum_{j\in\Psi}q_{ji}^{R*}-\sum_{h\in\Phi(U)}q_{ih}^{R*}\Big]\times[\lambda_{4i}-\lambda_{4i}^*]\geqslant 0,$$
$$\forall(Q^1,Q^2,Q^3,Q^4,\lambda_3,\lambda_4)\in R_+^{2(H+K)(I+W)+2(I+W)J+2(I+W)}. \tag{10}$$

式 (10) 中, $\lambda_3=[\lambda_{31}\ \ \lambda_{32}\ \ \cdots\ \ \lambda_{3(I+W)}]^{\mathrm T}$ 和 $\lambda_4=[\lambda_{41}\ \ \lambda_{42}\ \ \cdots\ \ \lambda_{4(I+W)}]^{\mathrm T}$ 分别为 $I+W$ 个分销/回收中心与约束 (7) 和 (8) 相关的 Lagrange 乘子.

3) 对于零售商 j, 记 $d_j(\rho_j^N)$ 为零售商 j 处需求市场在价格为 ρ_j^N 时的需求量, 是随机变量; 密度函数为 $e_j(x,\rho_j^N)$; 密度函数的参数为 ρ_j^N; 概率分布函数为 $P_j(x,\rho_j^N)=P(d_j\leqslant x)=\int_0^x e_j(x,\rho_j^N)\mathrm{d}x$.

设 q_j^N 为零售商 j 从分销/回收中心购得产品总量, 且 $q_j^N=\sum_{i\in\Omega(V)}q_{ij}^N$. 对于零售商 j, 产品的销售量不能超过供给量 q_j^N 和消费区域的需求量 $d_j(\rho_j^N)$ 的最小值, 即不能超过 $\min\{q_j^N,d_j\}$. 令 $h_j^+=\max\{0,q_j^N-d_j\}$, $h_j^-=\max\{0,d_j-q_j^N\}$, 则 $\min\{q_j^N,d_j\}=d_j-h_j^-$, h_j^+ 和 h_j^- 的期望分别为

$$\mathrm{E}(h_j^+)=\int_0^{q_j^N}(q_j^N-x)e_j(x,\rho_j^N)\mathrm{d}x, \tag{11}$$
$$\mathrm{E}(h_j^-)=\int_{q_j^N}^{\infty}(x-q_j^N)e_j(x,\rho_j^N)\mathrm{d}x, \tag{12}$$
$$\mathrm{E}(\min\{q_j^N,d_j\})=\mathrm{E}(d_j-h_j^-)=\int_0^{\infty}xe_j(x,\rho_j^N)\mathrm{d}x-\int_{q_j^N}^{\infty}(x-q_j^N)e_j(x,\rho_j^N)\mathrm{d}x. \tag{13}$$

当零售商 j 处的供应量大于需求量时, 多余产品的单位处理费用为 $\theta_j^+\geqslant 0$; 当需求量大于供给量时, 短缺产品的单位机会成本为 $\theta_j^-\geqslant 0$. 设 ρ_j^{N*} 和 ρ_j^{R*} 分别为 ρ_j^N 和 ρ_j^R 的均衡值, 零售商/回收点 j 以利润最大化为目标, 故其优化模型为

$$\max E(\rho_j^{N*}\min\{q_j^N,d_j\})+\sum_{i\in\Omega(V)}\rho_{ji}^{R*}q_{ji}^R-E(\theta_j^+h_j^++\theta_j^-h_j^-)-\sum_{i\in\Omega(V)}\rho_{ij}^{N*}q_{ij}^N-f_j^R(Q^4)-\sum_{i\in\Omega(V)}\hat{c}_{ij}^N(q_{ij}^N)-f_j^N(Q^3)-\sum_{i\in\Omega(V)}\rho_j^{R*}q_{ji}^R-\sum_{i\in\Omega(V)}\hat{c}_{ji}^R(q_{ji}^R); \tag{14}$$
$$\text{s.t.}\ \sum_{i\in\Omega(V)}q_{ji}^R\leqslant E(\min\{q_j^N,d_j\}), \tag{15}$$
$$q_{ij}^N,q_{ji}^R\geqslant 0,\forall i\in\Omega(V). \tag{16}$$

其中: 式 (14) 为零售商/回收点 j 的利润, 式 (15) 表示回收点 j 回收的 EOL 产品不会大于产品的销售量, 式 (16) 为变量的非负约束.

设各成本函数均是连续可微凸函数, 所有零售商/ 回收点的最优条件和下列变分不等式的解是一致的, 即求解 $(Q^{3*},Q^{4*},\lambda_5^*)\in R_+^{2(I+W)J+J}$, 使其满足

$$\sum_{j\in\Psi}\sum_{i\in\Omega(V)}\Big[\rho_{ij}^{N*}+\frac{\partial\hat{c}_{ij}^N(q_{ij}^{N*})}{\partial q_{ij}^N}+\frac{\partial f_j^N(Q^{3*})}{\partial q_{ij}^N}+\theta_j^+P(q_j^{N*},\rho_j^{N*})-(\rho_j^{N*}+\theta_j^-+\lambda_{5j}^*)(1-P(q_j^{N*},\rho_j^{N*}))\Big]\times[q_{ij}^N-q_{ij}^{N*}]+\sum_{j\in\Psi}\sum_{i\in\Omega(V)}\Big[\frac{\partial\hat{c}_{ji}^R(q_{ji}^{R*})}{\partial q_{ji}^R}+\frac{\partial f_j^R(Q^{4*})}{\partial q_{ji}^R}+\rho_j^{R*}+\lambda_{5j}^*-\rho_{ji}^{R*}\Big]\times[q_{ji}^R-q_{ji}^{R*}]+$$
$$\sum_{j\in\Psi}\Big[E(\min\{q_j^N,d_j\})-\sum_{i\in\Omega(V)}q_{ji}^R\Big]\times[\lambda_{5j}-\lambda_{5j}^*]\geqslant 0,$$
$$\forall(Q^3,Q^4,\lambda_5)\in R_+^{2(I+W)J+J}. \tag{17}$$

式 (17) 中, $\lambda_5=[\lambda_{51}\ \ \lambda_{52}\ \ \cdots\ \ \lambda_{5J}]^{\mathrm T}$ 为 J 个零售商/回收点对于约束 (15) 的 Lagrange 乘子.

4) 需求市场的消费者会根据 EOL 产品的回收价格和交易成本来决定是否将 EOL 产品卖给回收点, 设消费者的偏好为连续函数 π_j, 且受到本消费区域回收量的影响, 即 $\pi_j=\pi_j(q_j^R)$. 因此, 需求市场的均衡条件[15]为

$$d_j(\rho_j^{N*})=\sum_{i\in\Omega(V)}q_{ij}^{N*}\text{几乎处处成立},\ \rho_j^{N*}>0;$$
$$d_j(\rho_j^{N*})\leqslant\sum_{i\in\Omega(V)}q_{ij}^{N*}\text{几乎处处成立},\ \rho_j^{N*}=0. \tag{18}$$

$$\pi_j(q_j^{R*})+\hat{c}_j^R(q_j^{R*})=\rho_j^{R*},\ q_j^{R*}>0;$$
$$\pi_j(q_j^{R*})+\hat{c}_j^R(q_j^{R*})\geqslant\rho_j^{R*},\ q_j^{R*}=0. \tag{19}$$
$$\sum_{i\in\Omega(V)}q_{ji}^{R*}=q_j^{R*},\ \rho_j^{R*}>0;$$
$$\sum_{i\in\Omega(V)}q_{ji}^{R*}\leqslant q_j^{R*},\ \rho_j^{R*}=0. \tag{20}$$

式 (18) 表示均衡状态下, 若零售商 j 处需求市场

的消费者愿意支付的均衡价格是正的, 则此处需求等于产品的总购买量, 否则小于总购买量; 式 (19) 指出, 若能从零售商 j 处需求市场的消费者回收 EOL 产品, 则消费者的偏好加上交易成本不会超过回收点愿意支付的价格; 式 (20) 表示若回收点 j 的 EOL 产品的回收价格是正的, 则此回收点总回收量等于 EOL 产品总供给量, 否则小于总供给量.

均衡状态下, 对于每个需求市场均必须满足式 (18) ~ (20), 条件为如下的变分不等式问题 (即求解 $(q^{R*},\rho_1^*,\rho_2^*)\in R_+^{3J}$, 使其满足下式):

$$\sum_{j\in\Psi}\Big[\sum_{i\in\Omega(V)}q_{ij}^{N*}-E(d_j(\rho_j^{N*}))\Big]\times[\rho_j^N-\rho_j^{N*}]+\sum_{j\in\Psi}[\pi_j(q_j^{R*})+\hat{c}_j^R(q_j^{R*})-\rho_j^{R*}]\times[q_j^R-q_j^{R*}]+\sum_{j\in\Psi}\Big[q_j^{R*}-\sum_{i\in\Omega(V)}q_{ji}^{R*}\Big]\times[\rho_j^R-\rho_j^{R*}]\geqslant 0,$$

$$\forall(q^R,\rho_1,\rho_2)\in R_+^{3J}. \tag{21}$$

均衡时, 各层决策者运往下层决策者的产品量必须等于下层决策者的接收量, 且网络间交易量和价格必须满足式 (5), (10), (17) 和 (21) 的和.

定义 1　随机需求闭环供应链网络均衡条件为: 各层决策者间产品流量是一致的, 产品流量和价格满足最优条件 (5), (10), (17) 和 (21) 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问题的解, 即求解 $\forall(q^{\mathrm{NEW}*},Q^{1*},Q^{2*},Q^{3*},Q^{4*},q^{R*},\rho_1^*,\rho_2^*,\lambda_1^*,\lambda_2^*,\lambda_3^*,\lambda_4^*,\lambda_5^*)\in A^\circ$, 使其满足

$$\sum_{h\in\Phi(U)}\Big[\frac{\partial f_h^N(q^{\mathrm{NEW}*})}{\partial q_h^{\mathrm{NEW}}}-\lambda_{1h}^*\Big]\times[q_h^{\mathrm{NEW}}-q_h^{\mathrm{NEW}*}]+\sum_{h\in\Phi(U)}\sum_{i\in\Omega(V)}\Big[\frac{\partial c_{hi}^N(q_{hi}^{N*})}{\partial q_{hi}^N}+\lambda_{1h}^*+\alpha\lambda_{2h}^*+\frac{\partial f_i^N(Q^{1*})}{\partial q_{hi}^N}+\frac{\partial\hat{c}_{hi}^N(q_{hi}^{N*})}{\partial q_{hi}^N}-\lambda_{3i}^*\Big]\times[q_{hi}^N-q_{hi}^{N*}]+$$
$$\sum_{h\in\Phi(U)}\sum_{i\in\Omega(V)}\Big[\frac{\partial c_{ih}^R(q_{ih}^{R*})}{\partial q_{ih}^R}+\frac{\partial f_h^R(Q^{2*})}{\partial q_{ih}^R}+b-\beta\lambda_{1h}^*-\lambda_{2h}^*+\frac{\partial f_i^R(Q^{2*})}{\partial q_{ih}^R}+\frac{\partial\hat{c}_{ih}^R(q_{ih}^{R*})}{\partial q_{ih}^R}+\lambda_{4i}^*\Big]\times[q_{ih}^R-q_{ih}^{R*}]+$$
$$\sum_{i\in\Omega(V)}\sum_{j\in\Psi}\Big[\frac{\partial c_{ij}^N(q_{ij}^{N*})}{\partial q_{ij}^N}+\lambda_{3i}^*+\frac{\partial\hat{c}_{ij}^N(q_{ij}^{N*})}{\partial q_{ij}^N}+\frac{\partial f_j^N(Q^{3*})}{\partial q_{ij}^N}+\theta_j^+P(q_j^{N*},\rho_j^{N*})-(\rho_j^{N*}+\theta_j^-+\lambda_{5j}^*)(1-P(q_j^{N*},\rho_j^{N*}))\Big]\times[q_{ij}^N-q_{ij}^{N*}]+$$
$$\sum_{i\in\Omega(V)}\sum_{j\in\Psi}\Big[\frac{\partial c_{ji}^R(q_{ji}^{R*})}{\partial q_{ji}^R}-\lambda_{4i}^*+\frac{\partial\hat{c}_{ji}^R(q_{ji}^{R*})}{\partial q_{ji}^R}+\frac{\partial f_j^R(Q^{4*})}{\partial q_{ji}^R}+\rho_j^{R*}+\lambda_{5j}^*\Big]\times[q_{ji}^R-q_{ji}^{R*}]+$$
$$\sum_{j\in\Psi}[\pi_j(q_j^{R*})+\hat{c}_j^R(q_j^{R*})-\rho_j^{R*}]\times[q_j^R-q_j^{R*}]+\sum_{j\in\Psi}\Big[\sum_{i\in\Omega(V)}q_{ij}^{N*}-E(d_j(\rho_j^{N*}))\Big]\times[\rho_j^N-\rho_j^{N*}]+\sum_{j\in\Psi}\Big[q_j^{R*}-\sum_{i\in\Omega(V)}q_{ji}^{R*}\Big]\times[\rho_j^R-\rho_j^{R*}]+$$
$$\sum_{h\in\Phi(U)}\Big[q_h^{\mathrm{NEW}*}+\beta\sum_{i\in\Omega(V)}q_{ih}^{R*}-\sum_{i\in\Omega(V)}q_{hi}^N\Big]\times[\lambda_{1h}-\lambda_{1h}^*]+\sum_{h\in\Phi(U)}\Big[\sum_{i\in\Omega(V)}q_{ih}^{R*}-\alpha\sum_{i\in\Omega(V)}q_{hi}^{N*}\Big]\times[\lambda_{2h}-\lambda_{2h}^*]+$$
$$\sum_{i\in\Omega(V)}\Big[\sum_{h\in\Phi(U)}q_{hi}^{N*}-\sum_{j\in\Psi}q_{ij}^{N*}\Big]\times[\lambda_{3i}-\lambda_{3i}^*]+\sum_{i\in\Omega(V)}\Big[\sum_{j\in\Psi}q_{ji}^{R*}-\sum_{h\in\Phi(U)}q_{ih}^{R*}\Big]\times[\lambda_{4i}-\lambda_{4i}^*]+$$
$$\sum_{j\in\Psi}\Big[E(\min\{q_j^N,d_j\})-\sum_{i\in\Omega(V)}q_{ji}^R\Big]\times[\lambda_{5j}-\lambda_{5j}^*]\geqslant 0. \tag{22}$$

其中

$$\forall(q^{\mathrm{NEW}},Q^1,Q^2,Q^3,Q^4,q^R,\rho_1,\rho_2,\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3,\lambda_4,\lambda_5)\in A^\circ,$$
$$A^\circ\equiv R_+^{2(H+K)(I+W)+3(H+K)+2(I+W)J+2(I+W)+4J}.$$

证明　将式 (5), (10), (17) 和 (21) 相加并作简单处理即可得证. □

对于模型中的价格内生变量 ρ_{hi}^N, ρ_{ih}^R, ρ_{ij}^N 和 ρ_{ji}^R, 可利用变分不等式求解这些变量的均衡值 ρ_{hi}^{N*}, ρ_{ih}^{R*}, ρ_{ij}^{N*} 和 ρ_{ji}^{R*}. 由式 (5) 可知, 若 $\rho_{hi}^{N*}>0$, 则有

$$\rho_{hi}^{N*}=\frac{\partial c_{hi}^N(q_{hi}^{N*})}{\partial q_{hi}^N}+\lambda_{1h}^*+\alpha\lambda_{2h}^*, \tag{23}$$

或等价地, 由式 (10) 有

$$\rho_{hi}^{N*}=\lambda_{3i}^*-\frac{\partial\hat{c}_{hi}^N(q_{hi}^{N*})}{\partial q_{hi}^N}-\frac{\partial f_i^N\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hi}^N}; \tag{24}$$

若 $\rho_{ih}^{R*}>0$, 则由式 (5) 有

$$\rho_{ih}^{R*}=\beta\lambda_{1h}^*+\lambda_{2h}^*-\frac{\partial c_{ih}^R(q_{ih}^{R*})}{\partial q_{ih}^R}-\frac{\partial f_h^R(Q^{2*})}{\partial q_{ih}^R}-b, \tag{25}$$

或等价地, 由式 (10) 有

$$\rho_{ih}^{R*}=\frac{\partial f_i^R(Q^{2*})}{\partial q_{ih}^R}+\frac{\partial\hat{c}_{ih}^R(q_{ih}^{R*})}{\partial q_{ih}^R}+\lambda_{4i}^*; \tag{26}$$

若 $\rho_{ij}^{N*}>0$, 则由式 (10) 有

$$\rho_{ij}^{N*}=\frac{\partial c_{ij}^N(q_{ij}^{N*})}{\partial q_{ij}^N}+\lambda_{3i}^*, \tag{27}$$

或等价地, 由式 (17) 有

$$\rho_{ij}^{N*}=(\rho_j^{N*}+\theta_j^-+\lambda_{5j}^*)(1-P(q_j^{N*},\rho_j^{N*}))-$$

$$\frac{\partial \hat{c}_{ij}^{N}(q_{ij}^{N*})}{\partial q_{ij}^{N}}-\frac{\partial f_{j}^{N}(Q^{3*})}{\partial q_{ij}^{N}}-\theta_{j}^{+}P(q_{j}^{N*},\rho_{j}^{N*}); \tag{28}$$

若 $\rho_{ji}^{R*}>0$, 则由式 (10) 有

$$\rho_{ji}^{R*}=\lambda_{4i}^{*}-\frac{\partial c_{ji}^{R}(q_{ji}^{R*})}{\partial q_{ji}^{R}}, \tag{29}$$

或等价地, 由式 (17) 有

$$\rho_{ji}^{R*}=\frac{\partial \hat{c}_{ji}^{R}\left(q_{ji}^{R*}\right)}{\partial q_{ji}^{R}}+\frac{\partial f_{j}^{R}\left(Q^{4*}\right)}{\partial q_{ji}^{R}}+\rho_{j}^{R*}+\lambda_{5j}^{*}. \tag{30}$$

为了方便引用式 (22), 现将其以如下标准变分不等式形式表示, 即求解 $X^{*}\in A^{\circ}$, 使其满足

$$\langle F(X^{*}),\ X-X^{*}\rangle\geqslant 0,\ \forall X\in A^{\circ}. \tag{31}$$

其中

$$X\equiv(q^{\rm NEW},Q^{1},Q^{2},Q^{3},Q^{4},q^{R},\rho_{1},\rho_{2},\lambda_{1},\lambda_{2},\lambda_{3},\lambda_{4},\lambda_{5});$$

$$F(X)\equiv[F_{1i},F_{2hi},F_{3hi},F_{4ij},F_{5ij},F_{6j},F_{7j},F_{8j},F_{9h},F_{10h},F_{11i},F_{12i},F_{13j}]_{\forall hij}^{\rm T},$$

F 各个分量分别为式 (22) 中各乘号前面部分构成的函数; 符号 $\langle\cdot,\cdot\rangle$ 为 N 维欧氏空间内积.

2.2.2 设施竞争选址模型

在随机需求闭环供应链网络均衡模型的基础上, 建立设施竞争选址模型, 将均衡模型作为选址模型的约束条件之一, 即将均衡约束捕捉的由新进设施引起的网络均衡状态的变化引入到位置决策过程中, 由此得到如下均衡约束数学规划模型:

$$\begin{aligned}\max \sum_{i\in\Theta(V)}\Big[&\sum_{h\in\Phi(U)}(\rho_{ih}^{R}q_{ih}^{R}-\rho_{hi}^{N}q_{hi}^{N})+\sum_{j\in\Psi}(\rho_{ij}^{N}q_{ij}^{N}-\\&\rho_{ji}^{R}q_{ji}^{R})\Big]+\sum_{h\in\Gamma(U)}\sum_{i\in\Omega(V)}(\rho_{hi}^{N}q_{hi}^{N}-\rho_{ih}^{R}q_{ih}^{R})-\\&\sum_{h\in\Gamma(U)}\Big\{f_{h}^{N}(q^{\rm NEW})+f_{h}^{R}(Q^{2})+\sum_{i\in\Omega(V)}[c_{hi}^{N}(q_{hi}^{N})+\\&c_{ih}^{R}(q_{ih}^{R})]+b\sum_{i\in\Omega(V)}q_{ih}^{R}\Big\}-\sum_{i\in\Theta(V)}\Big\{\sum_{h\in\Phi(U)}[\hat{c}_{hi}^{N}(q_{hi}^{N})+\\&\hat{c}_{ih}^{R}(q_{ih}^{R})]+\sum_{j\in\Psi}[c_{ij}^{N}(q_{ij}^{N})+c_{ji}^{R}(q_{ji}^{R})]+f_{i}^{N}(Q^{1})+\\&f_{i}^{R}(Q^{2})\Big\}-\sum_{h\in\Gamma(U)}U_{h}TR_{h}-\sum_{i\in\Theta(V)}V_{i}TT_{i},\end{aligned} \tag{32}$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{h=H+1}^{H+G}U_{h}=K, \tag{33}$$

$$\sum_{i=I+1}^{I+S}V_{i}=W, \tag{34}$$

$$\text{式 (22)},\ h\in\Phi(U),\ i\in\Omega(V), \tag{35}$$

$$U_{h},V_{i}=0\ \text{或}\ 1. \tag{36}$$

其中: 式 (32) 为新进企业总利润, 式 (33) 为制造/再制造工厂数量约束, 式 (34) 为分销/回收中心数量约束, 式 (35) 为均衡约束, 式 (36) 为 0-1 约束.

3 模型求解算法

设施竞争选址模型属于均衡约束数学规划问题, 主要解决两个问题: 一是由均衡约束条件 (即式 (35)) 分析新进设施引起的网络均衡状态的变化, 即产品生产量、设施间产品交易量和交易价格等指标的决策问题; 二是在第 1 个问题的基础上解决设施的位置决策问题. 因此, 本文为了求解此均衡约束数学规划问题, 应用 Korpelevich 提出的修正投影算法[16]来求解均衡问题 (35), 即求解在 $h\in\Phi(U),i\in\Omega(V)$ 条件下的式 (22), 并在此基础上, 应用遗传算法解决设施的位置决策.

修正投影算法求解均衡模型 (22), 算法实现如下:

Step 1: 初始化. 设置迭代次数 $M=1$, 步长 δ 满足 $0<\delta\leqslant 1/L$ (L 为 Lipschitz 常数), $\varepsilon>0$, 初始值 $X^{0}\in A^{\circ}$.

Step 2: 通过下列变分不等式问题求解 $\overline{X}^{M}$:

$$\langle(\overline{X}^{M}+\delta F(X^{M-1})-X^{M-1})^{\rm T},\ X-\overline{X}^{M}\rangle\geqslant 0,\quad \forall X\in A^{\circ}.$$

Step 3: 通过下列变分不等式问题求解 X^{M}:

$$\langle(X^{M}+\delta F(\overline{X}^{M})-X^{M-1})^{\rm T},X-X^{M}\rangle\geqslant 0,\quad \forall X\in A^{\circ}.$$

Step 4: 若 $\max|X^{M}-X^{M-1}|\leqslant\varepsilon$, 则停止循环; 否则, 令 $M=M+1$, 返回 Step 2.

在此基础上, 利用修正投影算法与遗传算法相结合的混合算法来求解设施竞争选址模型. 具体步骤如下:

Step 1: 初始化. 置代计数器 gen $=1$, 设置最大遗传代数 Maxgen. 首先进行编码, 整个编码向量为 $G+S$ 位, 前 G 位表示是否建立制造/再制造工厂, 后 S 位表示是否建立分销/回收中心, 编码时每位在 $\{0,1\}$ 中选取, 且考虑式 (33) 和 (34) 的限制, 产生包含 Pop_size 个染色体的初始种群.

Step 2: 对于每个染色体, 利用修正投影算法计算产品生产量、网络间交易量和交易价格, 根据求得的结果计算每个染色体的目标函数值, 然后根据目标值采用压差为 2 的排序方法计算各染色体的适应度.

Step 3: 对染色体进行遗传操作. 选择: 使用轮盘赌算法选择新种群. 交叉: 采用单点交叉策略, 将种群中染色体两两随机配对, 然后随机选择一基因位作为交叉点, 依一定的交叉概率互换交叉点后面部分的染色体. 同时检验每个后代的可行性, 即编码提到的限制. 若均是可行的, 则用它代替其父代; 否则保留其中

可行的, 重新进行交叉操作, 直到得到两个可行的后代或循环指定次数为止. 变异: 采用两点变异, 依一定的变异率选择一个染色体作为父代, 随机选择两个变异位进行变异操作, 同时考虑染色体的可行限制.

Step 4: 重复 Step 2 和 Step 3 至指定的循环次数, 从种群中选择最优的个体和其对应的产品生产量、网络间的交易量及交易价格作为模型的最优结果.

4 算例分析

首先针对新进企业进入前的网络利用修正投影算法求解均衡模型 (22), 分析市场原有闭环供应链网络中各工厂的新产品、再制造产品生产量、网络中各决策者间产品交易量及交易价格的均衡状态. 在此基础上, 考虑一大型企业进入该市场, 利用混合算法求解选址模型 (32)∼(36), 分析新进企业进入后对原有网络均衡状态的影响, 以及如何在竞争中决策最佳位置策略.

设新企业进入市场前的闭环供应链网络结构包括 2 个制造/再制造工厂, 2 个分销/回收中心, 10 个零售商/回收点及相应的需求市场, 各成本函数如下:

$$f_h^N(q^{\mathrm{NEW}}) = 2(q_h^{\mathrm{NEW}})^2 + h^{1/3} q_h^{\mathrm{NEW}},\ \forall h;$$

$$f_h^R(Q^2) = \Big(\beta \sum_i q_{ih}^R\Big)^2 + \beta \sum_i q_{ih}^R,\ \forall h;$$

$$c_{hi}^N(q_{hi}^N) = (h+i)^{1/3} (q_{hi}^N)^2,\ \forall h, i;$$

$$c_{ij}^N(q_{ij}^N) = 2(q_{ij}^N)^2,\ \forall i, j;$$

$$c_{ih}^R(q_{ih}^R) = (h+i)^{-1/3} (q_{ih}^R)^2,\ \forall h, i;$$

$$c_{ji}^R(q_{ji}^R) = 2.5(q_{ji}^R)^2,\ \forall h, i;$$

$$f_i^N(Q^1) = 0.02\Big(\sum_h q_{hi}^N\Big)^2,\ \forall i;$$

$$f_j^N(Q^3) = 3\sum_i q_{ij}^N,\ \forall j;$$

$$f_i^R(Q^2) = 0.01\Big(\sum_h q_{ih}^R\Big)^2,\ \forall i;$$

$$f_j^R(Q^4) = 2\sum_i q_{ji}^R,\ \forall j;$$

其余交易成本为零, 偏好函数为 $\pi_j(Q^4) = 0.6 q_j^R$, $b = 1$, $\beta = 0.6$, $\alpha = 0.3$, $\theta_j^+ = \theta_j^- = 1, \forall j$. 设随机需求 $d_j(\rho_j^n)$ 服从均匀分布 $[0, b_j/\rho_j^n]$, $b_j = 500, \forall j$.

针对新企业进入前的上述网络, 利用修正投影算法编写基于 Matlab 的应用程序, 步长 $\delta = 0.01$, $\varepsilon = 10^4$. 得到的网络均衡结果为

$q_1^{\mathrm{NEW}*} = 7.44,\ q_2^{\mathrm{NEW}*} = 7.06;$

$q_{11}^{N*} = 6.16,\ q_{12}^{N*} = 5.53,\ q_{21}^{N*} = 5.81,\ q_{22}^{N*} = 5.42;$

$q_{11}^{R*} = 3.39,\ q_{21}^{R*} = 3.70,\ q_{12}^{R*} = 3.40,\ q_{22}^{R*} = 3.55;$

$q_{1j}^{N*} = 1.20,\ q_{2j}^{N*} = 1.10,\ \forall j;$

$q_{j1}^{R*} = 0.68,\ q_{j2}^{R*} = 0.73,\ q_j^{R*} = 1.40,\ \forall j;$

$\rho_j^{N*} = 108.58,\ \rho_j^{R*} = 0.84,\ \forall j;$

$\rho_{h1}^{N*} = 46.27,\ \rho_{h2}^{N*} = 46.71,\ \forall h;$

$\rho_{1h}^{R*} = 6.37,\ \rho_{2h}^{R*} = 6.62,\ \forall h;$

$\rho_{ij}^{N*} = 51.53,\ \rho_{ji}^{R*} = 2.84,\ \forall i, j.$

现有一个大型企业进入该市场, 新进企业在 5 个备选地点选择 3 个地点建立工厂, 在 5 个备选地点选择 3 个地点建立分销/回收中心. 原有各设施的成本函数不变, 各备选设施的成本结构与前文相同. 各备选工厂地点依次排序为 3∼7, 即相应成本函数中 $h = 3, 4, \cdots, 7$, 各备选分销/回收中心依次排序为 3∼7, 即相应成本函数中 $i = 3, 4, \cdots, 7$, 其他参量不变. 设新进企业在备选地点建立制造/再制造工厂的固定成本分别为 20, 30, 35, 20 和 15, 在备选地点选择建立分销/回收中心的固定成本分别为 16, 10, 12, 10 和 8. 编写基于 Matlab 的混合算法应用程序, 模型参数设置如下: 种群规模为 80, 进化代数为 25, 交叉率为 0.8, 变异率为 0.1, 步长 $\delta = 0.01$, $\varepsilon = 10^4$. 得到网络均衡结果为

q^{NEW}:

$q_1^{\mathrm{NEW}*} = 4.99,\ q_2^{\mathrm{NEW}*} = 4.85,\ q_3^{\mathrm{NEW}*} = 4.75,$

$q_4^{\mathrm{NEW}*} = 4.53,\ q_5^{\mathrm{NEW}*} = 4.47;$

Q_1:

$q_{11}^{N*} = 1.94,\ q_{12}^{N*} = 1.76,\ q_{13}^{N*} = 1.55,\ q_{14}^{N*} = 1.43,$

$q_{15}^{N*} = 1.39,\ q_{21}^{N*} = 1.80,\ q_{22}^{N*} = 1.69,\ q_{23}^{N*} = 1.54,$

$q_{24}^{N*} = 1.44,\ q_{25}^{N*} = 1.41,\ q_{31}^{N*} = 1.71,\ q_{32}^{N*} = 1.64,$

$q_{33}^{N*} = 1.53,\ q_{34}^{N*} = 1.44,\ q_{35}^{N*} = 1.41,\ q_{41}^{N*} = 1.55,$

$q_{42}^{N*} = 1.53,\ q_{43}^{N*} = 1.47,\ q_{44}^{N*} = 1.43,\ q_{45}^{N*} = 1.40,$

$q_{51}^{N*} = 1.52,\ q_{52}^{N*} = 1.50,\ q_{53}^{N*} = 1.46,$

$q_{54}^{N*} = 1.42,\ q_{55}^{N*} = 1.40;$

Q_2:

$q_{11}^{R*} = 0.87,\ q_{21}^{R*} = 0.95,\ q_{31}^{R*} = 1.05,\ q_{41}^{R*} = 1.12,$

$q_{51}^{R*} = 1.15,\ q_{12}^{R*} = 0.91,\ q_{22}^{R*} = 0.96,\ q_{32}^{R*} = 1.02,$

$q_{42}^{R*} = 1.07,\ q_{52}^{R*} = 1.08,\ q_{13}^{R*} = 0.94,\ q_{23}^{R*} = 0.96,$

$q_{33}^{R*} = 1.00,\ q_{43}^{R*} = 1.02,\ q_{53}^{R*} = 1.03,\ q_{14}^{R*} = 0.98,$

$q_{24}^{R*} = 0.96,\ q_{34}^{R*} = 0.95,\ q_{44}^{R*} = 0.94,\ q_{54}^{R*} = 0.94,$

$q_{15}^{R*} = 0.98,\ q_{25}^{R*} = 0.96,\ q_{35}^{R*} = 0.93,$

$q_{45}^{R*} = 0.92,\ q_{55}^{R*} = 0.91;$

Q_3:

$q_{1j}^{N*} = 0.85,\ q_{2j}^{N*} = 0.81,\ q_{3j}^{N*} = 0.76,$

$q_{4j}^{N*} = 0.72,\ ,q_{5j}^{N*} = 0.70,\ \forall j;$

Q_4:

$q_{j1}^{R*}=0.47,\ q_{j2}^{R*}=0.48,\ q_{j3}^{R*}=0.50,$

$q_{j4}^{R*}=0.51,\ q_{j5}^{R*}=0.51,\ \forall j;$

$q^R:\ q_j^{R*}=2.46,\ \forall j;$

$\rho_1:\ \rho_j^{N*}=65.03,\ \forall j;$

$\rho_2:\ \rho_j^{R*}=1.48,\ \forall j;$

ρ_{hi}^n:

$\rho_{11}^{N*}=25.86,\ \rho_{12}^{N*}=26.03,\ \rho_{13}^{N*}=26.28,\ \rho_{14}^{N*}=26.45,$

$\rho_{15}^{N*}=26.52,\ \rho_{21}^{N*}=25.86,\ \rho_{22}^{N*}=26.03,\ \rho_{23}^{N*}=26.28,$

$\rho_{24}^{N*}=26.45,\ \rho_{25}^{N*}=26.52,\ \rho_{31}^{N*}=25.86,\ \rho_{32}^{N*}=26.03,$

$\rho_{33}^{N*}=26.28,\ \rho_{34}^{N*}=26.45,\ \rho_{35}^{N*}=26.52,\ \rho_{41}^{N*}=25.23,$

$\rho_{42}^{N*}=25.47,\ \rho_{43}^{N*}=26.28,\ \rho_{44}^{N*}=26.45,\ \rho_{45}^{N*}=26.52,$

$\rho_{51}^{N*}=25.30,\ \rho_{52}^{N*}=25.53,\ \rho_{53}^{N*}=26.28,$

$\rho_{54}^{N*}=26.45,\ \rho_{55}^{N*}=26.52;$

ρ_{ih}^R:

$\rho_{1h}^{R*}=5.91,\ \rho_{2h}^{R*}=5.97,\ \rho_{3h}^{R*}=6.05,$

$\rho_{4h}^{R*}=6.11,\ \rho_{5h}^{R*}=6.13,\ \forall h;$

$\rho_{ij}^N:\ \rho_{ij}^{N*}=29.60,\ \forall i,j;$

$\rho_{ji}^R:\ \rho_{ji}^{R*}=3.48,\ \forall i,j.$

对上述新企业进入前后的均衡结果分析可知:

1) 将新企业进入前后得到的模型结果进行整理, 得到新企业进入前后竞争对手新产品生产量、产品(包括新产品和再制造产品) 生产总量、销售价格、回收价格、回收量的变化情况, 结果如表 1 所示.

表 1 新企业进入后对竞争对手相关经济指标的影响

	均衡结果	新企业进入前	新企业进入后
新产品生产量	工厂 1	7.44	4.99
	工厂 2	7.06	4.85
总生产量	工厂 1	11.69	8.07
	工厂 2	11.23	7.88
回收量	回收点 j $\forall j$	1.41	2.47
销售价格	零售商 $j \forall j$	108.58	65.03
回收价格	回收点 j $\forall j$	0.84	1.48
利润	工厂 1	239.24	83.61
	工厂 2	228.47	80.90
	分销/回收中心 1	43.50	23.44
	分销/回收中心 2	40.08	22.04
	零售商/回收点 $j, \forall j$	60.80	60.24

由表 1 可知, 与新企业进入前比较, 新企业的进入使市场竞争越来越激烈, 由于竞争的影响, 市场上原有两个工厂的新产品生产量、产品生产总量均显著降低. 新企业的进入引起市场供给的增加, 导致零售商在需求市场产品销售价格明显降低, 各回收点从需求市场回收 EOL 产品价格有所增加, 回收量增大.

2) 由新企业进入前后得到的均衡结果进一步可求得网络中各成员利润的变化情况, 如表 1 所示. 由表 1 可知, 由于新企业的进入, 新企业与其竞争对手竞争市场份额, 导致各工厂和各销售/回收中心的利润均显著降低.

3) 新企业的位置策略选择情况及其相关经济指标情况如下: 新企业选择 3, 6 和 7 号备选地址开设制造/再制造工厂; 选择 4, 6 和 7 号备选地址开设分销/回收中心; 3 个工厂再制造产品的生产量分别为 2.98, 2.85 和 2.83; 产品生产总量分别为 7.73, 7.38 和 7.30; 3 个工厂的利润分别为 78.86, 72.66 和 71.76; 3 个分销/回收中心的利润分别为 18.93, 17.96 和 17.58.

根据以上分析可见, 新企业的进入使市场竞争态势更趋激烈, 它与竞争对手竞争市场份额, 降低了竞争对手的生产量, 使竞争对手获得的经济利润也明显下滑. 同时, 由于市场供给的增加, 新企业的进入使得需求市场产品销售价格降低, 也改变了网络间交易价格模式. 因此, 新企业可以通过模型研究竞争对手的相关信息, 提取对自己有效的部分, 配合自身战略目标制定正确的市场进入策略, 使自身的优势和资源得以应用和延伸.

5 结 论

本文建立了随机需求闭环供应链网络设施竞争选址模型, 使用均衡模型捕捉由新企业进入引起的网络均衡状态的变化, 利用均衡模型得到的均衡结果作为选址模型的输入进行选址决策. 提出了遗传算法与修正投影算法相结合的混合算法, 通过实例计算新企业进入前原有网络的均衡状态, 并分析了由于新企业的进入对原有网络均衡状态产生的影响, 同时得到新企业的位置决策. 进一步的研究可以考虑随机环境下的多产品情形或考虑更多的随机因素.

参考文献(References)

[1] Fleischmann M, Beullens P, Bloemhof-Ruwaard J M, et al. The impact of product recovery on logistics network design[J]. Production Operations Manage, 2001, 10(2): 156-173.

[2] Schultmann F, Engels B, Rentz O. Closed-loop supply chains for spent batteries[J]. Interfaces, 2003, 33(6): 57-71.

[3] 代颖, 马祖军, 刘飞. 再制造闭环物流网络优化设计模型[J]. 中国机械工程, 2006, 17(8): 809-814.
(Dai Y, Ma Z J, Liu F. Optimization model for closed-loop logistics network design in a remanufacturing environmen[J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2006, 17(8): 809-814.)

[4] Zhou G, Cao Z, Qi F, et al. A genetic algorithm approach on a logistics distribution system with uncertain demand and product return[J]. World J of Modeling and Simulation, 2006, 2(2): 99-108.
[5] El-Sayed M, Afia N, El-Kharbotly A. A stochastic model for forward-reverse logistics network design under risk[J]. Computers and Industrial Engineering, 2010, 58(3): 423-431.
[6] Tobin R L, Friesz T L. Spatial competition facility location models: Definition, formulation and solution approach[J]. Annals of Operations Research, 1986, 6(3): 49-74.
[7] Friesz T L, Tobin R L, Miller T C. Existence theory for spatially competitive network facility location models[J]. Annals of Operations Research, 1989, 18(1): 267-276.
[8] Miller T C, Friesz T L, Tobin R L. Heuristic algorithms for delivered price spatially competitive network facility location problems[J]. Annals of Operations Research, 1992, 34(1): 177-202.
[9] Cavazzuti E, Pappalardo M, Passacantando M. Nash equilibria, variational inequalities, and dynamical systems[J]. J of Optimization Theory and Applications, 2002, 14(3): 491-506.
[10] 徐庆, 朱道立, 鲁其辉. Nash 均衡、变分不等式和广义均衡问题的关系[J]. 管理科学学报, 2005, 8(3): 1-7.
(Xu Q, Zhu D L, Lu Q H. Relations among Nash equilibrium, variational inequalities and generalized equilibrium problem[J]. J of Management Sciences, 2005, 8(3): 1-7.)
[11] Nagurney A, Dong J, Zhang D. A supply chain network equilibrium model[J]. Transportation Research, 2002, 38(5): 281-303.
[12] Dong J, Zhang D, Nagurney A. A supply chain network equilibrium model with random demands[J]. European J of Operational Research, 2004, 156(1): 194-212.
[13] Bazaraa M S, Sherali H D, Shetty C M. Nonlinear programming: Theory and algorithms[M]. New York: John Wiley and Sons, 1993: 110-312.
[14] Auslender A, Teboulle M. Lagrangian duality and related multiplier methods for variational inequality problems[J]. SIAM J on Optimization, 2000, 10(4): 1097-1115.
[15] Samuelson P A. Spatial price equilibrium and linear programming[J]. American Economic Review, 1952, 42(3): 283-303.
[16] Korpelevich G M. The extragradient method for finding saddle points and other problems[J]. Matekon, 1977, 13(4): 35-49.

(上接第1552页)

[3] Liu Y Q, Wang J L, Yang G H. Reliable control of uncertain nonlinear systems[J]. Automatica, 1998, 34(7): 875-879.
[4] Yang G H, Wang J L, Soh Y C. Reliable guaranteed cost control for uncertain nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(11): 2188-2192.
[5] Qu Z H, Ihlefeld C M, Jin Y F, et al. Robust fault-tolerant self-recovering control of nonlinear uncertain systems[J]. Automatica, 2003, 39(10): 1763-1771.
[6] Yang H, Jiang B, Staroswiecki M. Supervisory fault tolerant control for a class of uncertain nonlinear systems[J]. Automatica, 2009, 45(10): 2319-2324.
[7] Ma H J, Yang G H. Adaptive output control of uncertain nonlinear systems with non-symmetric dead-zone input[J]. Automatica, 2010, 46(2): 413-420.
[8] Zhou J, Zhang C J, Wen C Y. Robust adaptive output control of uncertain nonlinear plants with unknown backlash nonlinearity[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2007, 52(3): 503-509.
[9] Zhou J, Wen C, Zhang Y. Adaptive output control of nonlinear systems with uncertain dead-zone nonlinearity [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(3): 504-511.
[10] Chang Y C. Intelligent robust tracking control for a class of uncertain strict-feedback nonlinear systems[J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 2009, 39(1): 142-155.
[11] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(3): 347-355.
(Wang W, Zhang J T, Chai T Y．A survey of advanced PID parameter tuning methods[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26 (3): 347-355.)
[12] 张克勤, 苏宏业, 庄开宇, 等. 三级倒立摆系统基于滑模的鲁棒控制[J]. 浙江大学学报, 2002, 3(4): 404-409.
(Zhang K Q, Su H Y, Zhuang K Y, et al．Robust control based on sliding mode for a triple inverted pendulum[J]. J of Zhejiang University, 2002, 36(4): 404-409.)
[13] 何彦彦, 沈程智. 三级倒立摆系统的可控性与可观性[J]. 北京航空航天大学学报, 1996, 22(5): 545-549.
(He Y Y, Shen C Z. Triple inverted-pendulum system and analysis of its controllability and observability[J]. J of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1996, 22(5): 545-549.)